

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105999

综合化机载塔康测距的双天线分集接收设计与实现

孔令全

(中国电子科技集团公司第十研究所 成都 610036)

摘要: 塔康系统是近程军用无线电导航系统,针对现有机载塔康设备存在的测距跳变、无效和精度超差问题,分析了问题原因,介绍了塔康测距工作原理,结合综合化架构下的通信导航识别系统,提出了一种综合化机载塔康测距的双天线分集接收设计与实现方案,该方案介绍了综合化架构下的塔康功能方案构成,设计了双天线分集接收工作流程,分析了双天线分集接收的数据选择策略,提出并实现了基于测量结果决策级数据选择策略,采用卡尔曼滤波进行最优估计,通过比较距离预测残差,实时输出最优结果,解决了以往机载塔康天线切换的局限性及其存在的问题,并在实际工程中获得较好的应用。

关键词: 综合化;机载塔康;双天线分集接收;卡尔曼滤波

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Design and implementation of double antennas diversity receiving for the integrated airborne TACAN ranging

Kong Lingquan

(The 10th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

Abstract: TACAN system is near range military radio navigation system, aim at the problem of jump, invalid and accuracy error of airborne TACAN ranging, the cause of problem is analysed, the operating principle of TACAN ranging is introduced. Fall together the integrated communication navigation and identification system, a plan of double antennas diversity receiving design and implementation for the integrated airborne TACAN ranging is raised. In the plan, the constitution of integrated airborne TACAN is introduced, the working process of double antennas diversity receiving is designed, the data selection strategy of double antennas diversity receiving is analysed, the strategy of decision-level data selection based on measurement results is raised and implemented, the optimum estimation with Kalman filter is used in strategy, the optimum results is output by comparing prediction residual of the distance, solve limitations and problem of the handoff of antennas of airborne TACAN ranging, and it has been successfully utilized in engineering practice.

Keywords: integrated; airborne TACAN; double antennas diversity receiving; Kalman filter

0 引 言

塔康系统(tactical air navigation system, TACAN)又称战术空中导航系统,是为适应航空近程导航而开发的战术空中导航系统,包括机载塔康设备和地面信标台^[1-2]。机载设备与地面信标台配合,可完成空地测距、测向能力,同时多个机载塔康设备之间协作,也可完成空空测距。

近年来,随着航空电子技术的飞跃进步,航空电子系统已从分立式的独立设备发展至综合化模块化航空电子系统^[3-4]。而机载塔康功能也随着电子技术的发展实现了模块化、综合化设计,以往机载塔康功能采用单天线接收设

计,机载塔康测距存在测距跳变、无效和测距精度超差等问题,特别是在飞机机动情况下的空空测距,表现的尤为明显。主要原因如下:

- 1)受飞机天线布局影响,天线空域覆盖不够,因机体遮挡导致接收信号弱;
- 2)天线装机后存在极化损失,导致增益下降,部分方向接收信号弱;
- 3)功能接收单天线工作,空域覆盖靠天线切换实现,切换时间长,切换信号特征判据不准确等。

分集接收技术是一种有效抗衰落途径^[5-6],在接收端,接收机可以选择信噪比最高的信号或者合并多个接收信号

收稿日期:2021-03-16

来提高接收信噪比,从而可以可靠译码,获得更高的接收可靠性。为解决上述机载塔康功能问题,本文针对综合化通信导航识别系统架构下的机载塔康功能,提出了一种综合化机载塔康测距的双天线分集接收设计与实现方案,试飞验证表明,该实现方案弥补了以往塔康单天线工作切换存在的缺陷,有效解决了机载塔康测距跳变及无效问题,使机载塔康测距精度满足要求。

1 工作原理

机载塔康功能工作于 962~1 213 MHz 的 L 波段频段,主要完成空地测距、测向和空空测距,为飞机提供战术导航数据。

1) 空地测距原理

机载 TACAN 功能距离测量依据二次雷达工作原理。利用应答式脉冲测距原理,机上设备以 80~120 Hz(搜索状态)或 20~30 Hz(跟踪状态)速率发射询问脉冲对信号,地面信标台收到该询问脉冲后,经过一个固定延时,再向机载设备发出回答脉冲对信号,如图 1 所示。机载设备收到询问脉冲信号后,经过识别,选择出对自己的测距应答脉冲,并测出询问脉冲和信标台回答脉冲之间的时间间隔,该时间间隔是与距离成正比的。

$$D = C \times (T - T_0) / 2 \tag{1}$$

式中: D 为两飞机间的斜距; C 为光速; T 为从发出询问脉冲对到接收到应答单脉冲的时间间隔; T_0 为固定延时。

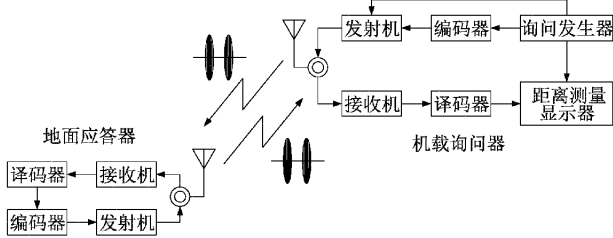


图 1 空地测距原理

2) 空空测距原理

空空模式下的距离测量同样基于二次雷达工作原理,利用两架飞机间相互询问、相互应答的方式,通过计算配对询问与应答脉冲在空间传输的时间,就可以测量两架飞机间的直线距离(斜距),如图 2 所示。空/空测距在飞机与飞机间进行,与地面台站无关。

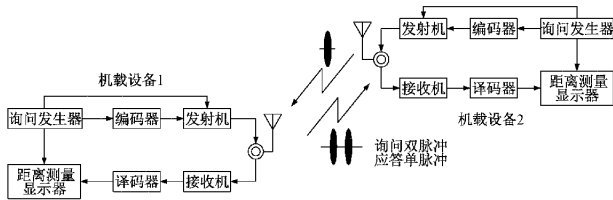


图 2 塔康空空测距原理

工作时一般由一架长机和几架僚机组成 1 个空/空工作体系,僚机不断地发射测距询问脉冲对,长机收到询问信

号后经过识别并按规定延迟时间 T 发射应答脉冲,僚机收到应答脉冲后进行同步识别,提取自己的应答脉冲,并按式(1)换算出僚机到长机的距离。

2 设计与实现

2.1 综合化机载塔康功能方案组成

在高度综合化和模块化航空电子系统中,天线孔径、射频前端处理均实现了综合化设计,与其他功能共用,综合化后的天线孔径通过多副天线实现空域覆盖,集成化的多通道处理实现了多通道信号实时处理^[7]。综合化架构下的塔康功能是在基于软件无线电理论的基础上设计与实现^[8], TACAN 功能实现所需要硬件资源组成如图 3 所示。

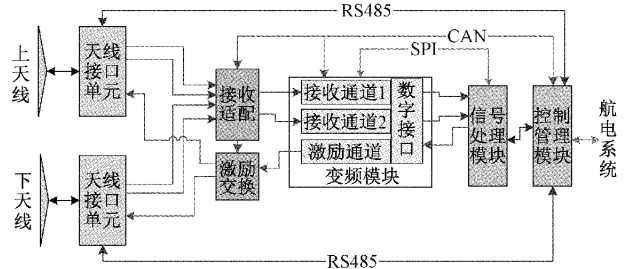


图 3 综合化架构下的塔康功能组成

TACAN 功能硬件资源组成包括天线、天线接口单元、接收适配、激励交换、信道处理和信号处理模块。其中天线、天线接口单元、接收适配、激励交换为共用资源,与其他综合化的 L 波段功能共用,信道变频模块和信号处理模块为通用资源,信道变频完成塔康信号的上下变频处理、增益控制和 AD/DA 数字化处理,信号处理完成信号调制解调、方位、距离信息处理。

其中在综合化系统设计中,为保证多通道实时处理的一致性,通用化模块化的天线接口单元、接收适配、变频模块等射频类处理模块在多通道接收设计上均采用了相同的通用功放、滤波、放大等处理器件,使得多通道实时接收的增益不一致性均控制在 1 dB 以内,处理时误差在 100 ns 量级,满足后端数字化多通道实时处理要求。后端的信号处理采用大规模现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA) + 数字信号处理器(digital signal processor, DSP)架构,在同一片 FPGA 中同时完成 2 路接收信号的实时变频和解调处理, DSP 中完成数据处理,保证了 2 路接收信号数字化处理的实时性和一致性。

2.2 工作流程设计

1) 接收流程

综合化 TACAN 功能双天线分集接收流程如图 4 所示, L 波段上、下天线来的 TACAN 信号分别在 2 个上、下天线接口单元分别进行匹配连接、滤波、放大等处理,经接收适配模块同时进行功分、放大等适配处理后,送至变频模块中同时进行下变频、放大、滤波等处理,形成标准中频信号,经过 A/D 转换后成数字中频信号。数字中频信号送到

信号处理模块进行并行解调处理和基带处理,并产生2路实时测量数据,最后通过采用基于测量结果决策级数据选择比较方法,选择出较优的测量数据结果,由控制管理最终输出送航电显控,莫尔斯码音频数据送音响中心处理。

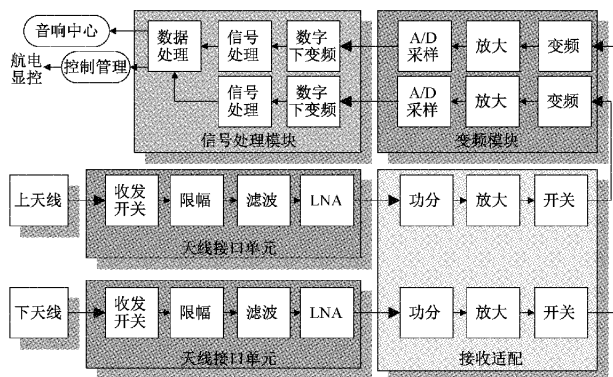


图4 塔康功能接收流程

2) 发射流程

考虑到双天线发射时的相互干扰,TACAN功能发射仍采用单天线发射,流程如图5所示,由信号处理产生所需的数字信号,送至变频模块完成D/A变换、变频后生成所需的激励信号,将激励信号通过激励交换同时路由至天线接口单元进行调制和最后的功率放大,天线接口单元将功率放大信号送上天线或下天线进行发射。

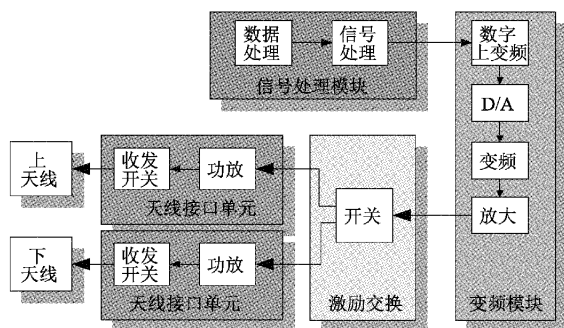


图5 塔康功能发射流程

发射时,发射天线的选择由接收信号决定,当功能选择出上天线或下天线测量数据较优时,同时产生发射开关、闭锁、触发脉冲、导脉冲控制和功放模式码离散脉冲信号,通过控制管理送给对应的上天线或下天线的天线接口单元,控制对应的天线接口单元通过天线进行信号发射。

2.3 双天线分集接收数据选择策略分析与设计

在分集接收终端,分集信号合并方式有选择式合并、等增益合并和最大比值合并^[9],考虑系统的复杂程度,TACAN测距双天线分集接收终端采用选择式合并方式选取最优测距数据输出,其双天线分集接收可用于数据选择的参量信噪比、接收信号幅度、频域信息和距离预测残差等,其中接收信号幅度、信噪比和频域信息均属于基于信号特征级选择策略的参量,距离预测残差属于基于测量结果

决策级选择策略的参量。

1) 双天线分集接收数据选择策略分析

以TACAN空空测距为例,数据选择策略参量分析如下:

(1)信噪比判决。根据塔康空空测距的原理可知,空空距离是由询问脉冲和应答脉冲之间的时间差测量而出的,应答脉冲为高斯单脉冲,信号特征较为简单。在目前综合化架构下两个接收通道硬件电路一致性较好,因此应答脉冲时间测量误差是关系空空距离测量精度的主要因素,空空距离测量应答脉冲时间的选取是高斯脉冲包络的半幅点,应答脉冲的前沿和信噪比是决定脉冲时间测量误差的主要原因,在两个接收通道性能和工作环境相同情况下,接收应答信号的信噪比决定了距离解算的精度。然而以上的分析是建立在理想塔康信号基础上的。当干扰信号为白噪声情况下,以信噪比作为比较条件是合理的。如果接收应答信号存在带内干扰,经过幅度解调后的脉冲包络信号会发生畸变,基于塔康信号脉冲包络半幅点检测原理,即使此时接收信号的信噪比很大,但解算出的距离数据也会出现较大偏差。基于此作如下仿真:设接收理想应答信号的信噪比为15 dB(如图6所示),如果存在带内同频干扰(如图7所示,干扰信号与应答信号比值为20 dB),则解调后的包络信号会出现严重变形(如图8所示),此时导致解调的距离数据出现30 m左右的偏差。因此,单从接收信号的信噪比出发,优选两个接收的距离数据是不完备的。

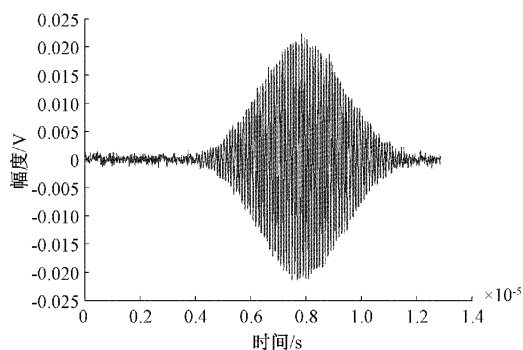


图6 理想信号图

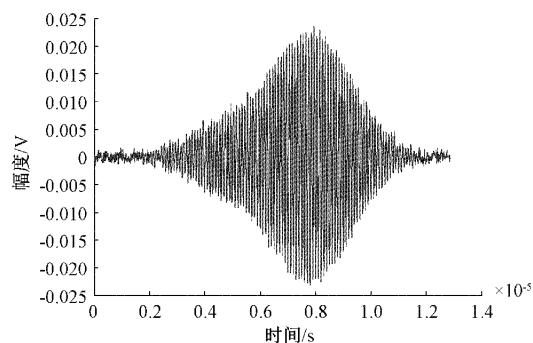


图7 干扰信号图

(2)频域信息判决。频谱分析只能提取出信号的频域信息,通过滤波,可对白噪声及带外噪声进行抑制,提高距

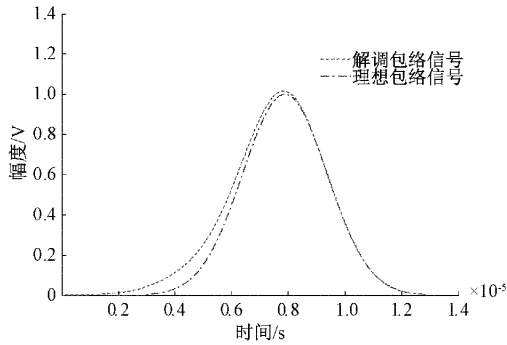


图 8 解调后包络信号

离测量精度,另外,由于塔康距离测量是基于脉冲信号时域半幅点进行的,干扰信号与接收应答信号在频域相互叠加,干扰信号自身信息很难单独提取出来,因此,从频域角度提取两个接收通道测距数据的选择条件很困难。

(3)信号幅度判决。同时在时域采用信号幅度作为判断依据,可直接根据两个接收通道 AGC 控制的衰减值和包络信号的幅值进行比较,在理想情况下由于飞机转弯受天线遮挡,上下天线接收到的信号幅度必然有差别,可直接由此选择信号幅度较强的一路数据进行输出,但实际情况空间信号较为复杂,在干扰存在的情况下,信号幅度强的未必解算出的距离精度高。

(4)距离预测残差判决。塔康测距一般采用 $\alpha \sim \beta$ 滤波进行距离平滑滤波和预测^[10-13],实际距离测量值与一步预测值的差值为距离预测残差,由于实际距离测量值包含了系统中噪声和干扰的影响,因此距离预测残差绝对值的大小间接反映了系统信号质量的好坏。

综上所述,考虑到塔康测距应答信号为高斯包络单脉冲,信号特征简单,且受多径及环境干扰等影响,单纯依靠信号特征信息进行数据选择并不可靠,因此选用距离预测残差作为选择参量,采用基于测量结果决策级数据选择策略作为双天线分集接收的数据选择策略。

2) 基于测量结果决策级数据选择策略设计

双天线接收时,在两个独立接收通道同时解算出距离的情况下,最终测量距离数据中包含有系统中噪声和干扰的影响,采用卡尔曼滤波进行最优估计^[11-16],通过比较距离测量值与距离预测之间的残差,来确定最终输出距离数据,具体实现原理如图 9 所示。

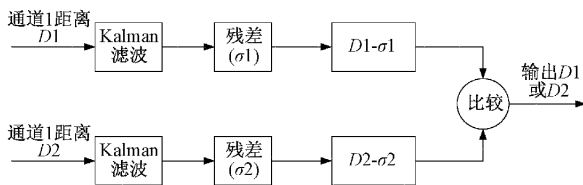


图 9 基于测量结果决策级数据选择实现原理

具体处理步骤如下:

(1) 建立距离滤波的差分方程

考虑到飞机飞行的机动性,将飞机的飞行速度、加速度等与距离相关的信息引入到差分方程,表示如下:

$$x(k+1) = x(k) + T \cdot \dot{x}(k) + \frac{1}{2} \cdot \ddot{x}(k) \cdot T^2 \quad (2)$$

$$\dot{x}(k+1) = \dot{x}(k) + T \cdot \ddot{x}(k) \quad (3)$$

$$\ddot{x}(k+1) = \ddot{x}(k) \quad (4)$$

式中: $x(k)$ 表示 k 时刻的距离; $\dot{x}(k)$ 表示 k 时刻的径向速度; $\ddot{x}(k)$ 表示 k 时刻的径向加速度。

这样,距离测量的状态方程和观测方程可以表示如下:

$$\mathbf{X}(k+1) = \boldsymbol{\phi} \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\omega}(k) \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}(k+1) + v(k+1) \quad (6)$$

状态矢量:

$$\mathbf{X}(k) = [x(k) \quad \dot{x}(k) \quad \ddot{x}(k)] \quad (7)$$

状态转移矩阵:

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

动态噪声矩阵:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{Z}(k)$ 是距离测量值,测量矩阵 $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 0]$, $\boldsymbol{\omega}(k)$ 是状态方程的过程噪声, $v(k)$ 是观测方程的观测噪声。

(2) 采用卡尔曼(Kalman)算法进行滤波处理

Kalman 算法计算过程如下:

计算状态变量的一步预测均方误差阵:

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \boldsymbol{\phi} \cdot \mathbf{P}_k \cdot \boldsymbol{\phi}^T + \mathbf{G} \cdot \mathbf{R}_w(k) \cdot \mathbf{G}^T \quad (10)$$

计算滤波增益矩阵:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) \cdot \mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}(k+1|k) \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_v)^{-1} \quad (11)$$

计算状态变量的滤波均方差阵:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1) \cdot \mathbf{H}) \cdot \mathbf{P}(k+1|k) \quad (12)$$

计算状态滤波值:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1) \cdot (\mathbf{Z}(k+1) - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{X}}(k+1|k)) \quad (13)$$

计算状态一步预测值:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \boldsymbol{\phi} \cdot \hat{\mathbf{X}}(k) \quad (14)$$

(3) 计算距离测量值与距离一步预测的残差 $d(k)$

$$d(k) = \mathbf{Z}(k) - \hat{x}(k|k-1) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{Z}(k)$ 为距离测量值; $\hat{x}(k|k-1)$ 为由 $k-1$ 的测量值,预测得到的 k 时刻距离值。

(4) 比较两个距离测量值与距离一步预测的残差 $d(k)$, 选择残差 $d(k)$ 绝对值较小的距离数据作为最终距离输出。

2.4 数据解算处理及选择流程设计与实现

TACAN 功能双天线接收的数据解算和最终数据输出

选择流程在 DSP 中完成,接收通道 1 和通道 2 软件处理流程一样,主要包括脉冲读取、识别、搜索、跟踪和滤波等,数据解算流程如图 10 所示,数据选择实现流程如图 11 所示。

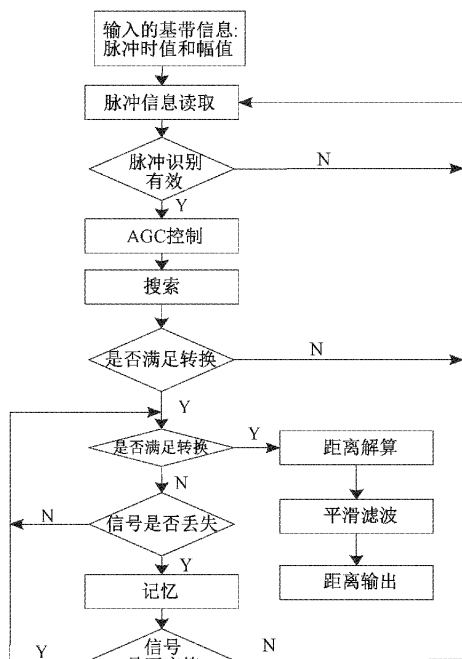


图 10 塔康功能数据解算流程

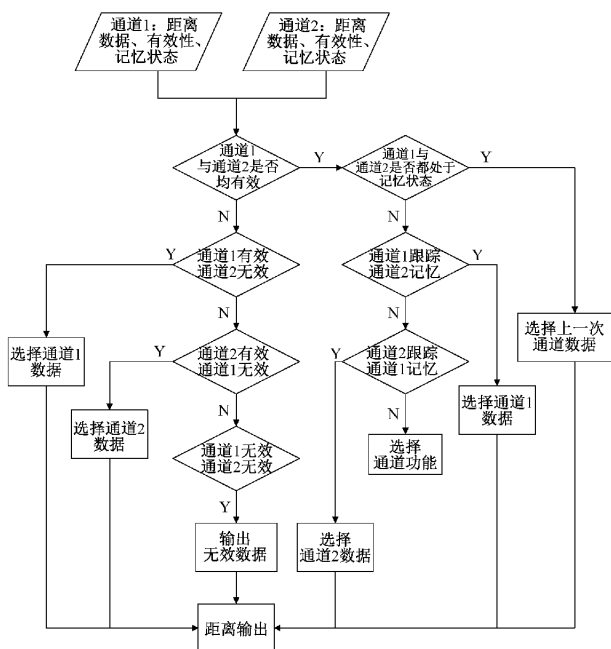


图 11 双天线接收数据选择实现流程

3 应用效果

上述综合化机载塔康测距的双天线分集接收方案已成功应用于某型飞机高度综合化通信导航识别系统上,完成了近 1 年多的试飞验证,与以往单天线方案相比,飞行验证

效果如图 12 和 13 所示。

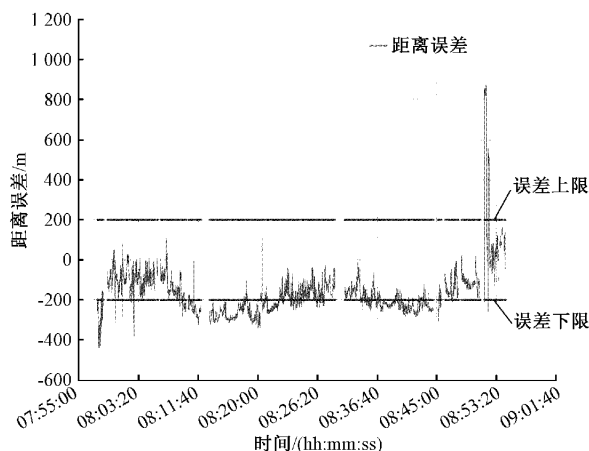


图 12 单天线接收方案空空测距误差曲线

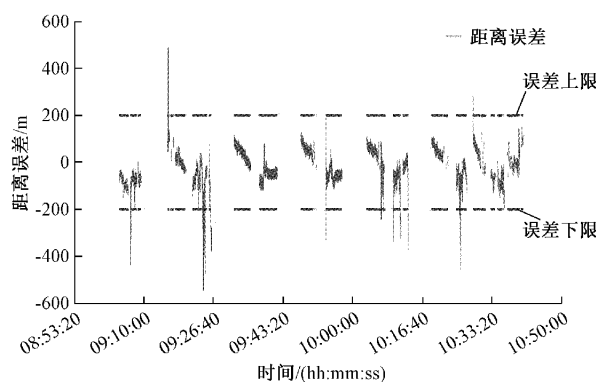


图 13 双天线接收方案空空测距误差曲线

试飞数据分析统计结果表明,多机试飞,且长僚机姿态 $\pm 20^\circ$ 以内时,最大测距错误率由 15.2% 降低至 4.1%,飞机交叉、转弯、机动飞行,最大测距跳点率由 13.8% 降低 3.7%,塔康空空大/小模式最大测距精度超差率由 37.6% 降低至 5% 以内,塔康功能测距精度满足指标要求,方案在综合化机载通信导航识别系统中获得了较好的应用效果。

4 结 论

本文针对机载塔康测距的跳变、无效和精度超差问题,提出了一种双天线分集接收方案,该方案结合综合化通信导航识别系统架构,阐述了综合化机载塔康功能构成、多通道接收增益一致性和实时性处理的硬件实现,设计了双天线分集接收的工作流程,对塔康双天线分集接收的数据选择特征参量进行了分析,设计了基于测量结果决策级数据选择策略,采用卡尔曼滤波进行最优估计,保证了塔康测距结果的最优输出,解决了以往机载塔康天线切换的局限性及其存在的问题。经长时间的试飞验证,机载塔康测距的跳变、无效问题得到了大幅度改善,精度超差问题得到解决,同时也验证了方案中提出的基于测量结果决策级数据选择策略的合理性,为分集接收设计终端数据合并选择提

供一种新的思路。

参考文献

- [1] 刘立盛,刘靖. 塔康导航系统地面专用检测设备校准方法研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(7):15-19.
- [2] 卫恒,王德功,刘扬,等. 基于 FPGA 实现塔康地面信标信号发生器设计[J]. 电子设计工程,2015,23(10):191-193.
- [3] 张凤鸣,褚文奎,樊晓光,等. 综合模块化航空电子体系结构研究[J]. 电光与控制,2009,16(9):47-51.
- [4] 王国庆,谷青范,王森,等. 新一代综合化航空电子系统架构技术研究[J]. 航空学报,2014,35(6):1473-1486.
- [5] 张会清,王普,高学金,等. 分集接收抗多径衰落性能及在隧道模型中仿真[J]. 电波科学学报,2010,25(4):793-797.
- [6] 周进. 一种改进的低复杂度双天线 RAKE 分集接收设计[J]. 通信技术,2019,52(7):1602-1605.
- [7] 孔令全. 综合化航电电子系统 BIT 设计[J]. 电子测量技术,2018,41(10):108-112.
- [8] 袁仁清. 机载 TACAN 的设计与实现[J]. 四川兵工学报,2014(4):26-28.
- [9] 苏天禹,汤旭东,宋大勇. 基于分集接收技术的岸海短波通信系统研究[J]. 舰船电子工程,2018,38(2):57-60.
- [10] 韩卫杰,赵建伟. 数字化塔康测距技术研究[J]. 现代导航,2012(1):24-27.
- [11] 张建明. 基于变维卡尔曼滤波的塔康距离跟踪算法[J]. 现代导航,2017(4):257-262.
- [12] TANG Z, MOHLER R R, KOLODZIEJ W J. On a simple adaptive tracking filter[J]. Control Conference, American,1982, 6(21):1398-1403.
- [13] KASSEL R J, BAXAE G. The effect of missing data on the steady-state performance of an alpha, beta tracking filter [C]. Proc. of the Twentieth Southeastern Symposium on System Theory, 1988: 526-529.
- [14] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction theory [J]. Journal of Basic Engineering, 1960,82(D):35-46.
- [15] KALMAN R E, BUCY R S. New results in linear filtering and prediction theory [J]. Journal of Basic Engineering,1961,83(D):85-108.
- [16] 付梦印,邓志红,闫莉萍. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

作者简介

孔令全,硕士研究生,主要研究方向为综合化航空电子系统设计、系统集成技术等。

E-mail:klq_good@163.com