

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.011

引用格式:邹洲. 海事卫星上行信号测向的工程实现[J]. 电讯技术,2014,54(7):921-925. [ZOU Zhou. Engineering Implementation of Direction-finding for Inmarsat Satellite Uplink Signals[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(7):921-925.]

海事卫星上行信号测向的工程实现*

邹 洲**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:结合海事卫星信号的信号特征,以相关干涉仪测向算法为基础,提出了一种海事卫星上行信号测向的工程实现方法,在一片 FPGA 中完成数字下变频、FFT 实时运算、相位差计算等复杂运算,在一片 DSP 中完成相关干涉仪方位计算。与以往的方法相比,该方法解决了对海事卫星上行信号测向的问题,频率分辨率被提高到 5.7 kHz;通过降低相位差的波动度和插值提高了方位的稳定度和精度;采取在 DSP 中完成方位计算的方式减少了 FPGA 器件数量。最后,试验结果验证了所提方案的实用性。
关键词:海事卫星;上行信号;测向;相关干涉仪;插值算法
中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-0921-05

Engineering Implementation of Direction-finding for Inmarsat Satellite Uplink Signals

ZOU Zhou

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

Abstract: According to the character of Inmarsat satellite signal and based on correlation interferometer direction-finding(DF) algorithm, this paper proposes an engineering implementation scheme of DF for Inmarsat satellite uplink signals in which the complex calculations such as signals digital down conversion, FFT real-time separation, phase difference computation are realized in an FPGA and calculation of azimuth in a DSP. Comparison with traditional scheme shows the proposed scheme solves the problem of DF for Inmarsat satellite uplink signals, the frequency resolution is increased to 5.7 kHz. Accuracy and stabilization of azimuth is improved through decreasing fluctuation of phase difference and applying interpolation algorithm. Calculation of azimuth is achieved in the DSP to reduce the number of FPGA components. Finally, the feasibility of the scheme is verified by test.
Key words: Inmarsat satellite; uplink signal; direction-finding; correlation interferometer; interpolation algorithm

1 引 言

国际海事卫星(Inmarsat)通信系统在各领域均得到广泛应用,尤其在遇险搜救、航空航天、民航客运等领域提供了可靠的通信保障。除此之外,国际海事卫星作为国际空间无线电通信站,担负着各种通信任务,包括为军队提供应急通信服务等。随着海事卫星信号在现代电子战争中发挥的作用越来越

重要,针对海事卫星信号的测向也成为现代电子战侦察技术研究的重要内容^[1]。对海事卫星终端发射的上行信号进行测向,可以准确掌握使用海事卫星终端进行通信的目标的运动轨迹,对最终获取目标的位置能起到很大的作用。
国内在测向方面的研究文献较多:文献[2]介绍了干涉仪测向体制的基本原理,分析了相位差模

* 收稿日期:2014-06-11;修回日期:2014-07-15 Received date:2014-06-11;Revised date:2014-07-15

** 通讯作者:zz14046497@ 163. Com Corresponding author:zz14046497@ 163. Com

糊对测向精度的影响;文献[3]提出了一种在 FPGA 中实现准实时测向的方法,但并行处理能力较弱,无法快速对多个频点的信号同时测向;文献[4]提出了适合 IFF 和 TACAN 脉冲的高精度实时测向模型,通过直接计算单脉冲 IQ 信号每一个样点的相位获取计算方位所需的相位差值,但对于短时长突发信号采用直接计算相位的方式会影响相位差的稳定性和实时性;文献[5]采用一块 DSP 和两块 FPGA 完成了60 MHz带宽内通信信号的准实时测向,但频率分辨率较低只有12.5 kHz,所计算的相位差稳定度不够,硬件资源消耗较大;文献[6]提出利用通信信号的四阶累积量中的信息进行测向,但是由于计算复杂,工程实现难度很大。

与常规通信信号不同,海事卫星信号均为短时长突发信号,突发的持续时间约为几十毫秒到几百毫秒。以常见的海事卫星 MINI-M 标准通信信号为例,调制方式为 OQPSK,速率为5.6 kb/s^[7]。

基于海事卫星信号的基本特征,本文提出了一种针对海事卫星上行信号的测向工程实现方法并给出了 FPGA 和 DSP 设计。与文献[4-5]相比,本文提出的海事卫星信号测向方法首先优化了信号预处理部分的设计,将测向的频率分辨率提高到了5.7 kHz,从而能够对频率间隔为10 kHz的两个海事卫星信号同时进行测向;其次,对相位差的计算方法做了改进,采用将多次 FFT 输出的 IQ 数据共轭相乘、累积、求平均和反正切运算的方式,在一定程度上消除了相位差波动时对测向精度的影响;最后,运用插值算法进一步提高了测向精度。

2 测向算法

2.1 测向算法选择

在实际的信号环境中,海事卫星信号的突发性和密集性也凸显了高速实时测向的重要性,所选择的测向算法必须实时性强、精度高、频率分辨率高。

测向体制大致可分为幅度体制、相位体制(含相位敏感型体制)、幅相结合体制及时差体制四大类。在通信(连续信号)领域,目前应用较多的是相位或相位敏感型测向体制,典型的如干涉仪、多普勒、瓦特逊-瓦特和阿德柯克等。相位或相位敏感型体制在准确度、灵敏度等性能上较其他体制有一定优势,更为重要的是它具有潜在的分辨多信号的能力,因此相位或相位敏感型体制(如相关干涉仪等)正逐渐应用于测向领域。

而相关干涉仪测向体制可以相对降低对硬件一致性的要求,只要求保持相对稳定,同时测向速度比较快,比较适合突发信号的测向,因此本方案中优先考虑相关干涉仪测向体制。

2.2 相关干涉仪测向原理

相关干涉仪测向技术是从传统干涉仪测向技术发展而来的。它不需要再按照经典的公式去计算,但仍然是利用天线之间的相位关系进行测向。来波在天线阵的每个阵元上产生感应电流,根据来波到达天线时间先后产生相位差。

入射信号经预处理后,输出为其实部与虚部,再送到测向部分。在测向部分首先分别求出该信号在多通道干涉仪的相位,然后以其中一个通道为参考,求出其余通道与参考通道的相位差,通过多组相对相位差来计算该信号的方位,整个测向过程的原理如图1所示。其中, $a_1、b_1、a_2、b_2、a_3、b_3$ 为FFT的输出实部与虚部, $\Phi_1、\Phi_2、\Phi_3$ 分别为其相位, $\Phi_{12}、\Phi_{13}$ 是以 Φ_1 参考的相对相位差。

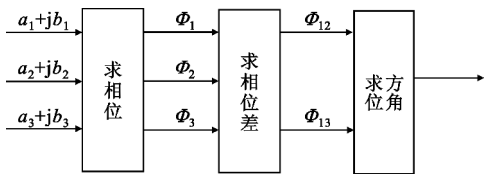


图1 测向原理框图
Fig. 1 Principle diagram of direction-finding

不同天线阵元之间的组合可以得出一组相位差,我们把这组相位差称为被测信号在天线阵的阵响应。在测向系统中,存在一个响应样本,这个样本是在设备出厂时,全频段、全方位收集的标准阵响应样本集。相关干涉仪测向就是将 $\Phi_{12}、\Phi_{13}$ 等构成的多组相对相位差与标准样本集进行相关比较,找出最相似的样本,根据样本在样本空间的位置,获取信号的人射方位。

海事卫星上行通信信号的频率范围为1 626.5 ~ 1 660.5 MHz,采用相关干涉仪测向方法,测向天线选取孔径为0.35 m的均匀圆阵。根据该天线阵的布阵形式,进行测向精度仿真分析,仿真条件为:信号频率范围为1 600 ~ 1 680 MHz频段,间隔5 MHz提取一个频点作为测向频点。由于信噪比等各种外界因素会引起相位的波动,一般来说,对设备中的固定相位偏差采用静态补偿等手段进行校正后,考虑各种综合因素影响,相位误差可以控制在20°以内。

所以在仿真中以随机值的形式引入相位差误差,随机值分在 10°以内、15°以内和 20°以内 3 种情况分别进行仿真分析,结果表明,假设引入的不可校正的相位差误差最大为 20°时,测向精度仍然能够小于 1°。所以,针对海事卫星信号的测向处理,采用相关干涉仪测向算法是完全适合的。

3 数字信号测向方案及实现

3.1 测向方案

测向方案原理如图 2 所示,A/D 采集单元对接收机输出的中频信号采样量化后,实时传输到测向单元。测向单元将多路 AD 数据进行抽取、下变频、滤波等预处理后,对预处理后的数据同时进行 FFT 运算,对高于门限的 FFT 输出的 IQ 幅度数据进行反正切运算提取相位差信息,最后采用相关干涉仪算法计算方位值。

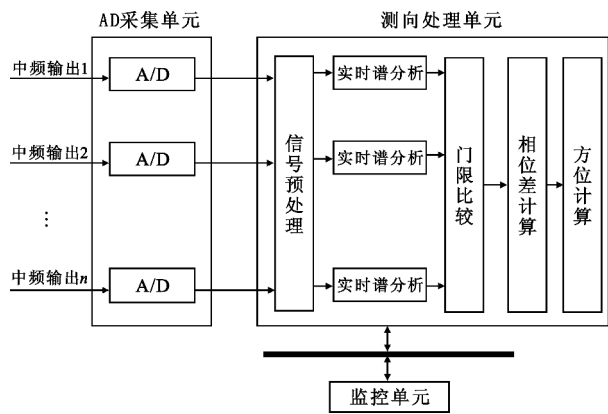


图 2 测向方案原理框图

Fig. 2 The block diagram of direction-finding

3.2 方案的 FPGA 和 DSP 实现

3.2.1 总体设计

FPGA 相对 DSP 并行处理能力要高得多,运算速度更快,但算法编程实现相对困难,而 DSP 的优点在于算法实现相对简单,命令控制更加灵活,但是处理速度较低。根据海事卫星信号测向的性能需求,测向部分的实现采用一片 DSP 和一片 FPGA 完成。FPGA 采用 Xilinx 公司的 V5SX95T,DSP 采用 TI 公司的 TMS6414 DSP 处理器。FPGA 主要完成数字下变频、FFT 实时运算、相位差计算等并行处理运算,DSP 主要完成方位计算、插值等计算功能。

整个测向模块由 FPGA+DSP 实现,架构框图如图 3 所示。

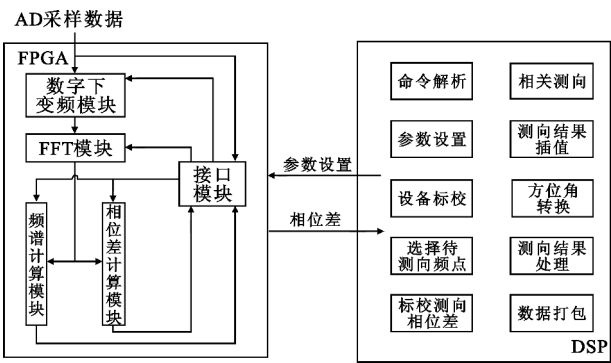


图 3 FPGA 和 DSP 软件架构框图

Fig. 3 Schematic diagram of FPGA and DSP software structure

3.2.2 测向的频率分辨率优化

R 表示频率分辨率, f_s 表示采样率, N 表示 FFT 点数。根据频率分辨率的公式

$$R = \frac{f_s}{N}, N = 2^n \tag{1}$$

海事卫星上行通信信号分布在1 626.5 ~1 660.5 MHz 频段内,那么测向带宽定为36 MHz覆盖整个频段较为合适。海事卫星上行信号之间的频率最小间隔为 10 kHz,要达到10 kHz 以上的测向频率分辨率, $N = 8\ 192$,通过计算可以得到 $R = 5.7\text{ kHz}$ 。

信号预处理模块包含对 A/D 数字信号的抽取、下变频、滤波处理三部分,考虑到上述因素,结合系统中 AD 采样率、接收机中频带宽、接收机中频中心频率,对不同的接收机输出带宽采用不同系数的 FIR 滤波器的 IP 核完成数字下变频设计。接收机的输出带宽为60 MHz,中心频率为140 MHz,A/D 采样率 F_s 为187.2 MHz,下变频采用 $F_s/4$ 混频,以降低资源消耗。CIC 滤波器级数建议大于等于 4;FIR 滤波器的采样率为46.8 MHz,通带截止频率为 18 MHz,阻带截止频率为20 MHz,阶数 50。预处理模块的实现框图如图 4 所示。

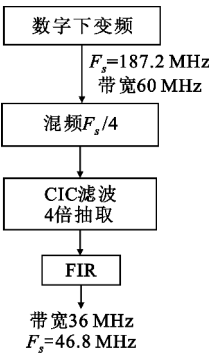


图 4 预处理模块实现框图

Fig. 4 Preprocessing module

3.2.3 相位差计算方法的改进

在对常规通信信号进行测向时,通常采用 FFT 运算和反正切函数相结合的方式计算相位差。FFT 运算产生的频谱数据为复数 IQ 数据,对其进行反正切运算就可以得到每个频点所对应的相位,再将每一路的相位互相进行相减运算,获得各路之间的相位差。但是当相位差值在 0°/360°或者±180°波动时,使用这种相位直接相减的方法有一定概率会引起相位差计算结果出错的情况,同时在受到外界干扰时,相位差在一定程度上会出现波动,会影响最终的方位计算结果。为解决这两个问题,本文对相位差计算方法进行了改进,其实现结构如图 5 所示。

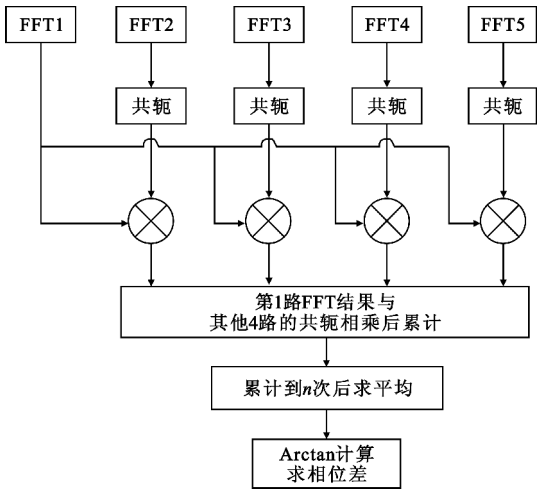


图 5 相位差计算原理框图

Fig.5 Phase difference calculation module

具体方法是采用 5 个 pipelined Streaming I/O 的 FFT 模块并行处理,将第 1 路 FFT 输出的每个频点所对应的 IQ 两路数据与其他 4 路 FFT 输出的每个频点对应的 IQ 两路数据的共轭值相乘,再经过 N 次相同的 FFT 和共轭相乘运算,将多次结果求和后再求平均,得到 4 组稳定的 IQ 数据并做反正切运算,可求得一组稳定的相位差。反正切计算采用 Cordic IP core 的 Arctan 运算完成,在 IP core 生成时合理选择 Iterations 及 Presision 的参数设置,在满足相位差精度的要求下,尽量减少资源消耗。

8 192 点 FFT 完成一次运算的时间约为 89 μ s,将 128 次 FFT 运算的结果累加求平均后求的相位差值,需耗费约 12 ms。由于海事卫星信号的突发持续时间至少为 20 ms 以上,所以这种相位差累积计算的方法完全满足海事卫星上行信号的测向实时性需求。

3.2.4 插值算法

根据相关系数公式

$$\rho_j = \cos(\varphi_j - \varphi_i) \tag{2}$$

其中, φ_j 是相位差库中待测向频点第 j 个建库方位下的相位差; φ_i 是待测向频点的已标校相位差, i 为相位差序号 ($i=1,2,\cdots,N$); j 为相位差建库方位序号 ($j=1,2,\cdots,M$, M 为某频点上建库方位个数)。

通过计算 M 个方位上的相关系数 ρ_j , 并计算 ρ_j ($j=1,2,\cdots,M$) 的最大值, 找出最大值对应的方位角, 即为粗测测向值 θ_c 。

由于硬件资源的限制, 相位差库中的角度间隔为 2°, 粗测向方位值即为 2 的整数倍, 通过插值运算可以提高测向方位的精度。

根据粗测测向值 θ_c 、粗测测向值的相关系数 ρ_j 、粗测测向值位置前一个点的相关系数 ρ_{j-1} 、粗测测向值位置后一个点的相关系数 ρ_{j+1} 、相位差库方位建库间隔为 θ_j , 可通过下式计算出通过余弦插值得到的细测测向结果 θ :

$$\theta = \frac{\rho_{j-1} - \rho_{j+1}}{2(\rho_{j-1} - 2\rho_j + \rho_{j+1})} \theta_j + \theta_c \tag{3}$$

4 实例数据解算验证

为了对本文提出的海事卫星信号测向系统方案的效果进行评估, 采用实际的海事卫星终端发射的上行突发通信信号作为 Matlab 仿真数据和硬件试验平台的输入数据, 信号的调制方式为 OQPSK 信号, 速率为 5.6 kb/s, 信噪比为 12 dB, 每一个突发的持续时间为 60 ~ 300 ms 左右, 信号入射方位角为 91.5°。经测试计算, 测向精度的实测值与理论值如图 6 所示。

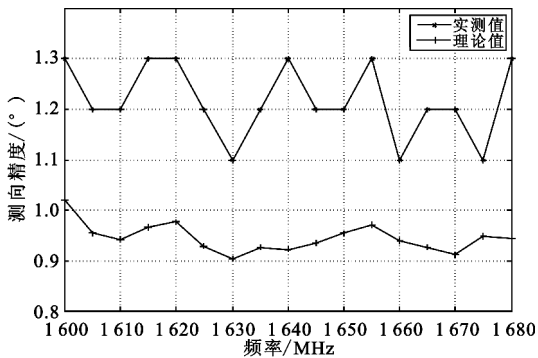


图 6 测向精度

Fig.6 Accuracy of direction-finding

从图 6 可以看出, 测向精度的实测值比理论值只降低了 0.5° 左右, 实测值的测向精度平均值达到了 1.3°。

试验硬件平台所使用的 FPGA 芯片为 Xilinx 公司的 xc5vsx95t,DSP 芯片为 TI 公司的 TMI6414t,FPGA 设计使用 Xilinx 公司的集成开发工具 ISE 进行仿真、综合、布线等。利用 ISE 软件内嵌的工具对 FPGA 的资源消耗情况进行统计,器件资源消耗情况如表 1 所示,其中使用率最大的 Slice 为 70%,Blockram 使用率为 63%,其余的都在 40% 以下。

表 1 FPGA 的资源占用情况

Table 1 FPGA resource consumption summary

FPGA 资源	使用量	总量	使用率
SILCE	10 201	14 720	70%
LUTS	23 026	58 800	39%
Blockram	156	244	63%
DSP48Es	259	640	40%

通过计算机的显控软件所显示的硬件平台综合处理结果如图 7 所示,包括功率(单位 dB)、信号中频输出频率、方位值等。从图 7 可以看出,显控软件所显示的测向结果与真实值 91.5°相比,测向精度仍优于 1.5°。

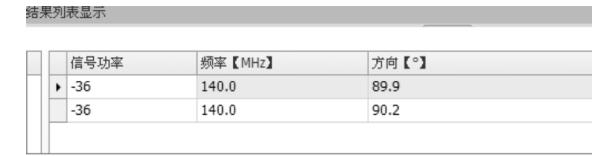


图 7 海事卫星信号测向结果

Fig. 7 The display of direction-finding result

5 结束语

本文结合海事卫星信号的特征,以相关干涉仪测向体制为基础,提出了适用于海事卫星信号测向处理的技术方法。该方法在 FPGA 和 DSP 中合理分配算法的实现模块,减少硬件资源的消耗,通过优化算法提高了测向的频率分辨率和相位差的稳定度,运用插值改善了测向精度。最后通过试验样机对实采海事卫星信号数据的测向分析结果可以证明,测向精度优于 1.5°,满足实际工程项目的需要。

在未来的研究工作中,可以以本文提出的测向方案为基础,根据工程的实际需要,进一步提高测向精度和频率分辨率。

参考文献:

[1] 李子木. 海事卫星系统发展及应用[J]. 无线电工程,

2009,39(10):8-10.
LI Zi-mu. Development and applications of Inmarsat system[J]. Radio Engineering of China,2009,39(10):8-10. (in Chinese)
[2] 王磊,束坤. 干涉仪测向中相关处理算法的研究[J]. 舰船电子对抗,2010,33(7):87-90.
WANG Lei,SHU Kun. Research into The Correlation Processing Algorithm in Interferometer Direction Finding[J]. Shipboard Electronic Countermeasure,2010,33(7):87-90. (in Chinese)
[3] 钱志柏,陈娜. 基于 DSP 的相关干涉仪测向快速实现方法[J]. 无线电工程,2011,41(8):47-50.
QIAN Zhi-bai,CHEN Na. Fast Implementation of Correlation Interferometer Direction Finding Based on DSP[J]. Radio Engineering,2011,41(8):47-50. (in Chinese)
[4] 龙慧敏. 脉冲实时测向算法的改进设计与实现[J]. 电讯技术,2012,52(9):1503-1507.
LONG Hui-min. Optimized Design and Implementation of Real-time DOA Estimation Technique for Pulse[J]. Telecommunication Engineering,2012,52(9):1503-1507. (in Chinese)
[5] 巢捷频. 高速宽带通信信号测向处理模块的设计与实现[J]. 电讯技术,2011,51(4):64-68.
CHAO Jie-pin. Design and Implementation of a High Speed Wideband Direction Finding Module for Communication Signals[J]. Telecommunication Engineering,2011,51(4):64-68. (in Chinese)
[6] 刘剑,黄知涛,周一宇. 基于四阶累积量的非圆信号测向方法[J]. 电子与信息学报,2008,30(4):876-880.
LIU Jian,HUANG Zhi-tao,ZHOU Yi-yu. A New Fourth-Order Direction Finding Algorithm for Noncircular Signals[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2008,30(4):876-880. (in Chinese)
[7] 邹洲. 海事卫星信号接收处理系统实现方案[J]. 电讯技术,2014,54(5):589-594.
ZOU Zhou. Receiving and Processing System for Inmarsat satellite Signal [J]. Telecommunication Engineering,2014,54(5):589-594. (in Chinese)

作者简介:



邹 洲(1982—),男,四川成都人,2007 年于电子科技大学获工学硕士学位,现为工程师,主要从事系统总体技术、通信信号处理等方面的研究。

ZOU Zhou was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1982. 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 system design technology, communication signal processing, etc.

Email: zz14046497@163.com