

文章编号:1001-893X(2011)05-0001-05

星载 AIS 接收系统设计与关键技术^{*}

潘宝凤,梁先明

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:针对星载 AIS(船舶自动识别系统)接收系统覆盖范围广、运动速度快等特点,提出了三种实现信号有效接收的总体方案。采用盲分离阵列信号处理方法、非线性测频和非相干解调方法解决了星载 AIS 接收系统中面临的信号碰撞、多普勒频移信号解调等关键技术问题,仿真和外场实验验证了方案的有效性和可行性。

关键词:星载 AIS;接收系统;信息碰撞;多普勒频移;盲源分离

中图分类号:TN971 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.05.001

Satellite – based AIS Receiver System Design and Related Key Techniques

PAN Bao-feng, LIANG Xian – ming

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

Abstract: According to the characters of the space – based AIS(Automatic Identification System) receiver with wide coverage and fast moving speed, three system design schemes are proposed to realize the efficient receiving of signal. The blind source separation array signal processing method, nonlinear frequency measuring and non – coherence demodulation method are used to solve the problems of signal overlapping and the demodulation of Doppler frequency shift signal. Simulations and outfield experiment are presented to verify the validity and feasibility of the proposed scheme.

Key words: satellite – based AIS; receiver system; message collision; Doppler frequency shift; blind source separation

1 引言

船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)是国际海事组织(IMO)、国际航标协会(IALA)、国际电信联盟(ITU – R)于 2000 年共同强力推广的一个具有船舶自动识别、通信和导航功能的新型助航电子系统。安装 AIS 应答机的船舶能自动和连续地播发出本船静态、动态、航次及安全短消息;同时,也自动地接收周围船舶发出的类似信息,并与海岸 AIS 基站进行信息交互,达到规避船舶碰撞、领航调度和航运管理等航行决策的目的^[1]。

随着全球经济一体化进程,海上运输和贸易高速增长,而海盗活动、走私等也愈演愈烈。如果利用 AIS 信息和雷达等其它信息综合判证,能及时发现海盗、走私等可疑船只,可在一定程度上遏制海上犯罪。虽然当前船台、岸站 AIS 系统支持确定船舶信息,但传输距离仅约 40 nmile,迫切需要创建一个系统来实现对全球海域的监控。卫星平台由于覆盖范围广,星载 AIS 系统可以实现对全球范围内海域的监视,近年来得到各国的重视。美国、德国、加拿大都先后发射了载有 AIS 接收设备的卫星。

要发展星载 AIS 系统,不可避免要应对新的技术挑战,其中重点要解决的是 AIS 信息碰撞时如何

^{*} 收稿日期:2011-04-07;修回日期:2011-05-17

提高卫星对舰船的检测概率问题。通常采用延长卫星观测时间、增加对感兴趣区域的访问频度和减少天线覆盖范围的方法,但以上方法仅当观测区域内舰船密度较低时,可以达到比较好的检测效果,其时效性和卫星利用率较低。文献[2]提出利用3副正交的偶极子天线,采用干扰对消的方法,可将2 000艘船的检测概率从35%提高到71%。加拿大发射的NTS卫星^[3],利用COM DEV Ltd. AIS接收机,通过信号分离技术使时频重叠AIS信号的检测概率大大增加,但具体技术细节不详。关于碰撞AIS信号的分离技术研究,国内刚刚处于起步阶段。另外,由于卫星的快速运动,星载AIS接收机还面临对大多谱勒频移信号的解调问题。此外,还有星载AIS天线的适应性设计、AIS信号衰减等问题。

2 星载 AIS 接收系统总体方案设想

星载 AIS 接收系统主要用于接收 AIS 信号,高效地完成对舰船目标的检测,并将收到的舰船信息下发到地面相关接收系统,实现对全球海域内舰船目标的监视。

星载 AIS 接收系统实现方案大体上可分为3种,下面分别介绍。

(1)方案 1

星载 AIS 接收系统对接收到的 AIS 信号进行低噪声放大后,送到后端的信号处理模块,完成信号的采集、存储,当卫星过顶时,再将存储的数据进行编码、调制和调频,通过卫星下行链路,转发到地面接收处理系统,事后完成 AIS 信号的解调、解译。

该方案的优点是:星上 AIS 接收系统的设计简单、可靠性高;可以充分利用地面计算资源,采用复杂的信号处理算法,实现对接收的时隙碰撞 AIS 信号的处理;信号处理效果好,舰船检测概率高。

但该方案实现起来存在以下不足:实时性差;系统总体成本费用高;由于是对原始 AIS 信号进行数据采集、存储,数据容量大,对星载存储器和数据传输通道要求极高;另外,对地面接收系统的要求也比较高,要求有高增益的接收天线和复杂的接收系统。

(2)方案 2

星载 AIS 接收系统对接收到的 AIS 信号进行低噪声放大后,送到后端的信号处理模块,完成时隙碰撞 AIS 信号的分离和 AIS 信号的解调、解译,解译结果经过编码、调制和调频后,通过 UHF 通信终端实

时下发到 AIS 地面接收站,包括船载机动接收站。

该方案的优点是:实时性高;系统总体成本费用低;数据容量小,对星上数据传输通道的要求低,便于实现;地面接收系统简单,可灵活多点布置。

但该方案实现起来存在以下不足: AIS 星上处理算法复杂,实现难度大;星上硬件设备的实时处理能力要求高,硬件设备复杂、成本高;信号处理效果相对较差。

(3)方案 3

星载 AIS 接收系统通过天线接收 AIS 信号,接收的 AIS 射频信号送到 AIS 接收机,经接收信道低噪声放大、滤波后,对输入的 AIS 射频信号直接进行带通采样、数字下变频,当接收到的信号质量比较好时,可直接完成信号的解调、解译,解译结果存入存储器中,并通过 UHF 信道以广播的方式实时转发到远洋机动舰船上;当接收信号质量差时,可以直接将数字下变频后的数据进行存储,待卫星飞回境内时将存储数据包括解调数据和原始采样数据通过遥感链路回放下传到地面固定接收站。机动接收站可实时接收卫星下传的 AIS 解译结果,完成舰船目标的态势显示;地面固定接收站可对下传的复杂 AIS 信号进行信号分离,再完成信号的解调、解译和舰船目标的态势显示,并可通过其它数据传输通道,将解译结果发送到相关的舰船上。其组成框图如图 1 所示。

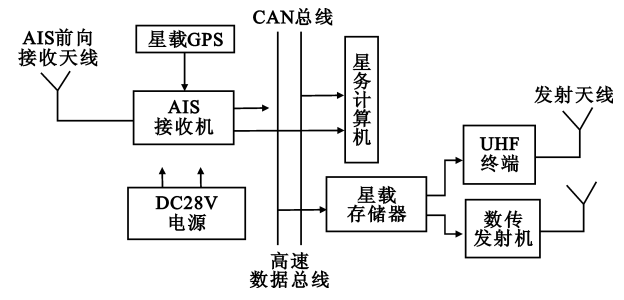


图 1 星载 AIS 接收系统组成框图(方案 3)

Fig.1 Block diagram of satellite-based AIS receiver system(Scheme 3)

与方案 1 和方案 2 相比,方案 3 既考虑到了 AIS 信息的有效性,又考虑到了对 AIS 信号的接收处理效果,在不增加星上设备硬件和算法复杂度情况下,保证了对舰船 AIS 信号高的检测概率,推荐使用。

3 星载 AIS 系统的关键技术

3.1 时隙碰撞时 AIS 信号的分离

由于星载 AIS 接收机侦收范围大,可以覆盖多

个工作小区,从而产生 AIS 信号的碰撞现象。AIS 信号的碰撞机理分为两类^[2]:一类是由于接收区域内包含多个自组织区域,不同组织区域内的舰船可能会在同一个时隙内发送 AIS 信息,并同时到达星载接收机,产生 AIS 信号碰撞;另一类是由于星载接收机可使收信号的区域大,监测区域内的舰船虽然在不同的时隙内发送 AIS 信息,但当舰船间距离足够远时,由于信号传输时延影响也可产生 AIS 信号同时到达的现象。

以上两种情况产生的 AIS 信号碰撞现象,都会导致 AIS 信息接收错误,使得对舰船检测的概率降低。

3.1.1 时隙碰撞 AIS 信号的分离方法

对于同频同时的多个信号分离,目前主要通过高精度测向加波束合成的方式和盲分离方式。前一种方式由于受天线、信道不一致性以及天线互耦、测向精度、环境条件等影响在实际工程中应用困难很大,但是理论上效果比较好;后一种方式是在未知源信号和传输通道参数的情况下,根据输入源信号的统计特性,仅由观测信号检测并分离出源信号中各个独立成分,对于天线、信道等要求不高。本文只讨论信号的盲源分离。

盲源分离是指在输入信号未知情况下,由观测到的系统输出信号来辨识系统,以实现对多个信号分离的目的,从而恢复原始信号。盲源分离的基本原理框图如图 2 所示。

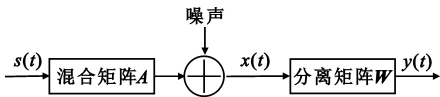


图 2 盲源分离基本原理框图
Fig.2 Principle diagram of blind source separation

设原始信号为 $s(t)$,经过未知通道混合矩阵 A 并加噪后为 $x(t)$,盲分离的实质是在源信号 $s(t)$ 和混合矩阵 A 都未知的情况下,根据观测数据 $x(t)$ 利用各源信号之间独立统计特性确定一分离矩阵 W ,使得 $y(t) = W * x(t)$ 成为 $s(t)$ 的估计。

当前,信号盲分离主要有基于阵元域的信号盲分离和基于波束域的信号盲分离两大类方法,其中基于阵元域的算法包括随机梯度法、自然梯度法、EASI(等变换自适应)算法等;另一大类是采用盲波束形成方式,其基本思路是利用观察信号估算期望信号的方向矢量,从而通过求逆得到分离矩阵(波束

形成的权向量)。

本文采用 1996 年 Cardoso J. F. 和 Laheld B. H.^[4]提出的一种借助独立性的等变化自适应分离 EASI 算法,完成了对时隙碰撞 AIS 信号的分离。

Cardoso J. F. 以极大似然函数作为准则,最大化对数似然获得最佳的分离矩阵,并提出了相对梯度的概念,即 $\nabla_{\phi}(\mathbf{W}) = \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{W}}(\mathbf{W}) \mathbf{W}^T$ 代替一般的随机梯度 $\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{W}}(\mathbf{W})$,其分离矩阵的迭代函数为

$$W(k+1) = W(k) + \mu \left[\frac{I - y(k)y(k)^H}{1 + \mu y(k)^H y(k)} + \frac{y(k)f(y(k)^H) - f(y(k))y(k)^H}{1 + \mu |y(k)^H f(y(k))|} \right] W(k) \tag{1}$$

式中, $f(y(k))$ 是 $y(k)$ 的非线性变换函数,它的选取与信号的高斯性有关,对于亚高斯信号,一般非线性函数选取为 $f(y(k)) = y(k) |y(k)|^2$ 。

由于盲分离的一个重要条件是原始信号之间是相互统计独立,所以在进行盲分离前需对观测信号进行白化处理,使得白化后的信号彼此线性无关,与原始信号之间只保留一个正交关系。

3.1.2 AIS 信号分离试验效果

AIS 信号分离试验采用五元天线阵,四通道接收机,利用改装后的 3 个 AIS 发射源产生 2 个或 3 个相碰撞的 AIS 信号,由信号处理终端完成信号的采集存储,事后完成信号的分离。试验框图如图 3 所示。

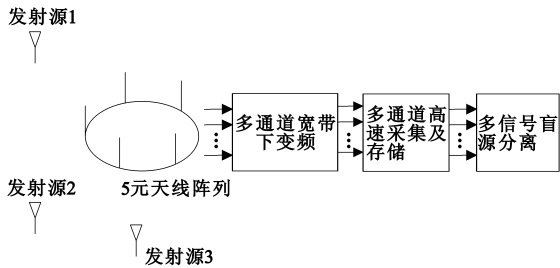


图 3 盲源分离数据采集试验框图
Fig.3 Data acquisition test for blind source separation

图 4 为重叠的两个 AIS 信号的频谱图,图 5 为 2 个混叠 AIS 信号分离后的频域、时域波形,图 6 是对分离后的两个 AIS 信号进行解调得到的基带波形,与单独信号的解调基带波形基本一致,说明分离效果很好。

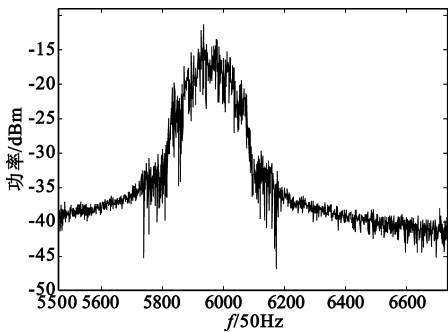


图 4 频谱重叠的两个 AIS 信号的频谱图
Fig. 4 Spectrum of two spectrum overlapping AIS signal

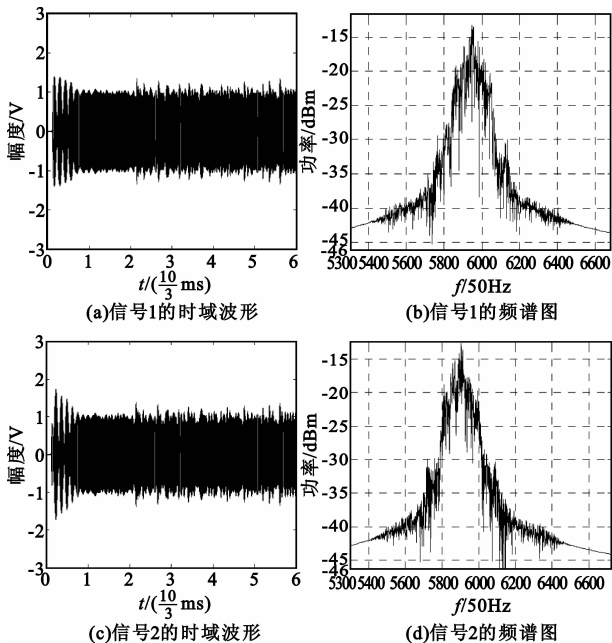


图 5 频谱重叠的两个 AIS 信号分离后的时域波形及频谱图
Fig. 5 Waveforms and spectrums of two seperated signals

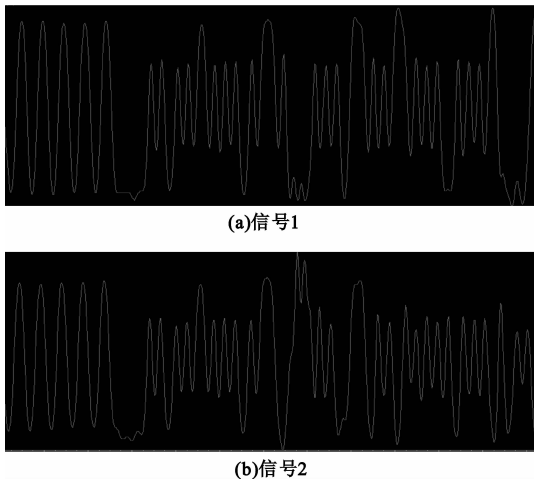


图 6 两个 AIS 信号分离后的解调基带波形
Fig. 6 Baseband waveforms of two seperated signals

3.2 带多普勒频移时 AIS 信号的检测与解调

由于卫星与船之间的高速相对运动,接收到的 AIS 信号将会产生多普勒频偏。对于运行在离海平面 600 km、速度为 7.56 km/s 的 AIS 星载系统,其最大频偏可达 4.082 kHz,而实际 AIS 有效信号带宽只有几千赫,所以多普勒的影响还是非常显著的。这里不能采用通常的 AFC 环路捕获及跟踪,因为 AIS 信号的同步序列很短(为 24 bit),AFC 环路捕获需要的时间相对较长,会造成 AIS 信息的丢失。

文献[5]给出了一种 GMSK 信号的多普勒频移快捕和跟踪方法,根据突发通信时帧结构的特点,采用独特码和 FFT 并行处理信号能量检测、帧同步和多普勒频移快捕,并采用判决反馈 PLL 环跟踪多普勒频移的变化,利用准相干解调法实现了对带多普勒频移时 GMSK 信号的解调。

文献[6]提出了一种基于软件无线电平台的 1 bit/2 bit GMSK 混合差分接收机方案,可在附加高斯白噪声和存在大多普勒频移的条件下,对星载环境无碰撞 AIS 信号进行可靠解调。接收机有两种工作状态:信号捕获状态和解调状态。用宽带滤波器和 1 bit 差分进行信号的捕获,用窄带滤波器和 2 bit 差分完成信号的解调。在解调前,先要进行信号捕获,在解调过程还未结束时,不进行信号的捕获。

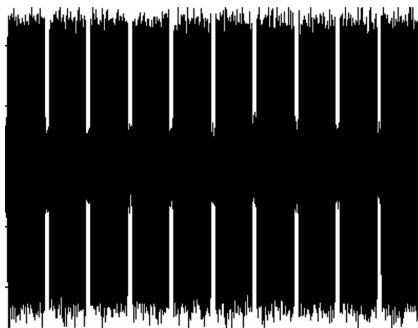


图 7 AIS 信号时域图
Fig. 7 Time domain waveforms of AIS signals

本文针对 AIS 信号的帧结构和在标准时隙时进行辐射的工作特点,采用一种基于非线性实时测频的乒乓解调的方案实现了对带多普勒频移 AIS 信号的解调。该方案实现的基本流程是首先查找标准时隙,进行高精度测频、数据缓存,再根据测频结果,采用非相干解调法完成对 AIS 信号的解调。利用 MATLAB 进行了此方法的解调仿真。程序产生 AIS 信号数据流,如图 7 所示,时域上相邻两个信号间频率间隔为 800 Hz,即每个 AIS 信号的载波频率不同,

且在标准频率 $\pm 4\text{ kHz}$ 范围内变化,利用上述方法对产生的 AIS 信号进行解调,通过将图 8 和图 9 原始码元序列和解调后的码元序列比对可以看出,该方案解调结果正确。

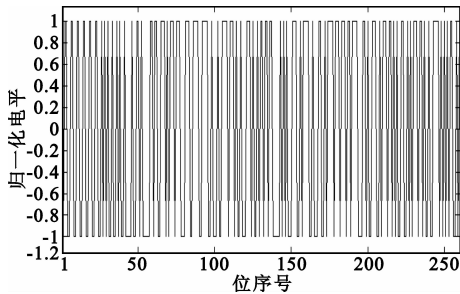


图 8 AIS 信号原始码元序列波形

Fig.8 Original code sequence waveforms of AIS signals

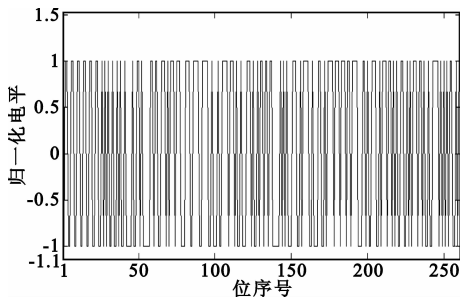


图 9 解调结果码元序列波形

Fig.9 Code sequence waveforms of demodulated AIS signals

图 8 和图 9 中,横坐标表示位序号,纵坐标用“1”或“-1”电平代表“0”、“1”码。

3.3 星载 AIS 天线的设计

对于星载 AIS 天线的设计必须考虑以下几个方面:

(1)将来的 AIS 载荷卫星可能体积上会很小,甚至可能是超小型或微型卫星,因此天线的体积、重量都不可能太大和太重;

(2)AIS 天线的波束宽度最好不要太宽,否则,其覆盖的区域面积就会很大,监测到的舰船数量也会很多,AIS 信号发生碰撞的机率就会增加,使得信号的侦收难度加大,舰船检测概率降低,当观测区域内舰船目标数超过 3 000 艘时,其舰船检测概率将会急剧地成数量级地下降;

(3)AIS 天线形成的方向图最好能使观测区域内接收到的 AIS 信号产生功率差,这样当信号碰撞时,便于信号的分离;

(4)AIS 天线最好采用圆极化方式,以减少极化损失。

4 结束语

本文给出了 AIS 接收系统总体方案设想,对星载 AIS 接收系统的关键技术进行了分析,提出了新的解决方案。今后对 AIS 接收系统上星的工程项目,重点需要解决 AIS 接收天线的适应性设计、时隙碰撞 AIS 信号分离算法的工程实现和时效性问题。另外,还需加强对单通道接收 AIS 碰撞信号分离算法的研究,与阵列处理系统相比,其在天线安装的适应性、系统的小型化方面将更具优势,特别是对微小卫星。

参考文献:

[1] GB/T 20068 – 2006, 船载自动识别系统(AIS)技术要求[S]. GB/T 20068 – 2006, Technical Requirements of Shipborne Automatic Identification System(AIS)[S]. (in Chinese)

[2] Ole Fredrik Haakonsen Dahl . Space – Based AIS Receiver for Maritime Traffic Monitoring Using Interference cancellation [D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2006.

[3] Cain J S, Meger E. Space-Based AIS: Contributing to Global Safety and Security[C]//Proceedings of the ISU 13th Annual Symposium. Strasbourg, France: [s. n.], 2009.

[4] Cardoso J F, Laheld B H. Equivariant adaptive Source separation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44 (12): 3017 – 3030.

[5] 吴团锋,朱爱民,杨喜根,等. GMSK 信号的多普勒频移快捕和跟踪[J]. 信号处理, 2006, 22(1): 114 – 118. WU Tian – feng, ZHU Ai – min, YANG Xi – gen, et al. Doppler frequency shift rapid acquisition and tracking for GMSK signals [J]. Signal Processing, 2006, 22(1): 114 – 118. (in Chinese)

[6] HICKS J, CLARK J, STOCKER J, et al. AIS/GMSK Receiver on FPGA Platform for Satellite Application[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5819: 403 – 414.

作者简介:

潘宝凤(1966—),女,四川自贡人,高级工程师,主要从事信号处理及侦察领域系统总体工作;

PAN Bao – feng was born in Zigong, Sichuan Province, in 1966. She is now a senior engineer. Her research concerns signal processing and the system design for signal reconnaissance.

Email: pan_bao_feng@sina.com

梁先明(1976—),男,湖南永顺人,高级工程师,主要研究方向为通信侦察领域信号处理及信号分析等。

LIANG Xian – ming was born in Yongshun, Hunan Province, in 1976. He is now a senior engineer. His research concerns signal processing and signal analysis for communication reconnaissance.

Email: liangxm@21cn.com