

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.10.011

星载 AIS 信号的带通采样与恢复^{*}

马社祥,方 婷^{**},官铭举,郭 鑫

(天津理工大学 计算机与通信工程学院,天津 300384)

摘 要:针对卫星接收机对模拟器件性能要求较高的问题,提出直接对接收到的射频信号进行采样,将模拟信号转换成数字信号,后续处理用软件模块实现的方法。同时结合自动识别系统(AIS)本身两个载波频率接近以及带宽较窄的特点,根据 Nyquist 带通抽样定理实现以较低速率采样来获取船舶状态信息,研究了一种星载 AIS 信号全数字解调方法和信息检测恢复技术。首先介绍了带通采样原理,其次详细研究了多用户 AIS 信号采样频率的确定、两个频道信号分离方法以及单通道信号如何下变频为基带信号,其中基带信号检测采用简化的基于 Viterbi 的非相干检测方法,最后结合 AIS 协议进行信号的恢复,并通过示波器采集实际船台发送的 AIS 信号进行了实验,验证了该过程的正确性。

关键词:自动识别系统;带通采样;数字解调;非相干检测;信息恢复

中图分类号:TN911.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)10-1312-05

Bandpass Sampling and Recovery of Satellite-based AIS Signal

MA She-xiang, FANG Ting, GONG Ming-ju, GUO Xin

(School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: According to the high performance requirements of satellite receiver for analog devices, this paper puts forward a new method of directly sampling the RF signal to convert the analog signal to digital signal and the subsequent processing in software module implementation. At the same time, in order to obtain the status information of the ship at a lower sampling rate according to Nyquist band-pass sampling theory and take full advantage of the characteristics of AIS (Automatic Identification System) whose two carrier frequencies are close to each other and the bandwidth is narrow, a digital demodulation method of satellite-based AIS signal and the information detection recovery technology is studied. Firstly, band-pass sampling theory is introduced. Secondly, the determination of the sampling frequency of multi-user AIS signal, two-channel signal separation method and how single-channel signal is down-converted to a base band signal are discussed in detail. The base band signal is detected by the simplified Viterbi-based non-coherent detection method. Finally, the digital signal is recovered according to AIS protocol specifications, and the experiment of using oscilloscope to collect AIS signal transmitted by the practical berth verifies the correctness of the process.

Key words: AIS; band-pass sampling; digital demodulation; non-coherent detection; information recovery

1 引 言

自动识别系统 (Automatic Identification System,

AIS) 是用于船舶以及基站之间一种新型系统,在海上船舶识别、安全监控和通信导航方面发挥了重要作用。但是已有的 AIS 系统存在一定局限性,其作

^{*} 收稿日期:2013-05-31;修回日期:2013-07-29 Received date:2013-05-31;Revised date:2013-07-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371108)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61371108)

^{**} 通讯作者:fangting2013@163.com **Corresponding author:** fangting2013@163.com

用距离较小,一般在 20 ~ 30 n mile 之间。而随着经济全球化的迅速发展,航运显得日益繁忙与重要,建立能够实现全球海域范围内船舶安全的监控系统显得尤为重要。由此星载 AIS 系统的研究倍受关注,通过卫星接收机可以接收全球海域内的船舶信号,实现远距离船舶航行的安全监控和导航服务。

传统的 AIS 系统针对两个频道设置两个接收机,每个接收机一般是将天线接收到的信号先进行各级放大、下变频、去载波、A/D 转换,再进行后续解码处理。而对于卫星 AIS 系统接收机,对模拟器件的稳定性、精确度等性能要求更高,对现有技术提出了挑战。本文提出直接对接收到的射频信号进行采样^[1-4],将模拟信号转换成数字信号,后续所有处理由软件模块来实现,有效避免了硬件设施性能对检测结果的影响,同时大大减低了硬件成本。但是若按低通采样理论,就要求 ADC 的抽样频率要大于被采样信号最高频率的 2 倍以上,而 AIS 信号的载频是 162 MHz 左右,直接对射频信号进行抽样,现有器件根本无法满足要求。由于 AIS 信号的带宽只有 25 kHz,是一窄带信号,同时两个频道仅相差 50 kHz,将两个频道合并起来仍然是一个窄带信号。根据 Nyquist 带通抽样定理,对于带通信号,其抽样速率并不一定要大于信号最高频率的 2 倍,用较低的采样速率也可以正确地反映带通信号的特性,即利用欠采样技术。对于采样后的信号,基于数字信号处理技术,将两个频道信号再分离,分别解调和解码。

2 带通采样原理

信号经过采样后,其频谱为原始模拟信号频谱的周期延拓,为了保证频谱无混叠,并由采样后信号完全恢复原信号,文献[5-6]给出了带通采样的一般结论,即采样频率满足如下条件:

$$\frac{2f_c+B}{m+1} \leq f_s \leq \frac{2f_c-B}{m}, 1 \leq m \leq n-1 \tag{1}$$

式中, B 为信号带宽; f_L 为信号最低频率; f_H 为信号最高频率; n 为 f_H/B 的整数部分; k 为 f_H/B 的小数部分, $0 < k < 1$; $f_c = f_L + (f_H - f_L)/2$ 是载波频率,同时也是信号的中心频率。式(1)的等价形式为

$$\frac{2f_H}{m+1} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{m}, 1 \leq m \leq n-1 \tag{2}$$

当 $m = n - 1$ 时可得到最低采样频率为

$$f_{smin} = 2B(1 + \frac{k}{n}) \tag{3}$$

当 f_L 很大时, f_{smin} 趋近于 $2B$ 。临界条件的采样

分析见文献[7]。

按上述采样频率采样,则原信号频谱的周期延拓形成的采样信号的频谱中,各个周期彼此不重叠,可以分离开来。从任一周期中均可恢复原模拟信号频谱信息,即将采样后信号通过如下理想带通滤波器即可,其中的 m 代表不同的周期,根据需要选取。

$$H(f) = \begin{cases} 1, -\frac{B}{2} + mf_s + \text{mod}(f_c, f_s) \leq |f| \leq \frac{B}{2} + mf_s + \text{mod}(f_c, f_s) \\ 0, \text{其他} \end{cases}, m \in N \tag{4}$$

或

$$H(f) = \begin{cases} 1, -\frac{B}{2} + mf_s + \text{mod}(-f_c, f_s) \leq |f| \leq \frac{B}{2} + mf_s + \text{mod}(-f_c, f_s) \\ 0, \text{其他} \end{cases}, m \in N \tag{5}$$

3 星载 AIS 信号带通采样与信号分离

AIS 系统工作在海上甚高频(VHF)段,有两个频道 CH87B (AIS1 161.975 MHz) 和 CH88B (AIS2 162.025 MHz),采用时分多址技术。将 1 min 划分为 2 550 个时隙,每个时隙大约为 26.67 ms,调制方式为高斯最小频移键控(Gaussian Minimum Shift Keying, GMSK),码元速率 R_b 为 9.6 kb/s,根据报告率在两个频道上交替发射调制信号,发送端载波如图 1 所示。

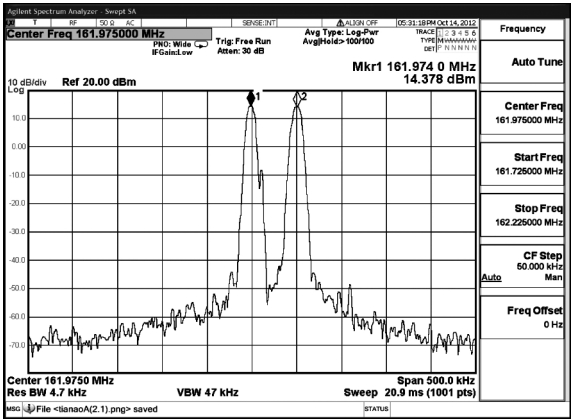


图 1 船台的 AIS 信号频谱图
Fig. 1 Spectrum of the AIS signal transmitted by the berth

3.1 星载 AIS 信号的带通采样

AIS 信号的带宽 $B = 25$ kHz,频道 CH87B 的中心频率 $f_{c1} = 161.975$ MHz,相应的最低频率和最高频率分别 f_{L1} 和 f_{H1} ;频道 CH88B 的中心频率为 $f_{c2} = 162.025$ MHz,相应的最低频率和最高频率分别为

f_{L2} 和 f_{H2} , 则 $f_{L1} = 161.962\ 5\ \text{MHz}$, $f_{H1} = 161.987\ 5\ \text{MHz}$, $f_{L2} = 162.012\ 5\ \text{MHz}$, $f_{H2} = 162.037\ 5\ \text{MHz}$ 。这两个频段的间隔是50 kHz。

对于传统的 AIS 船台,通常设计两个接收机分别接收两个频段的信号。但是对于星载接收机来说,由于卫星的高速运动使得信号产生多普勒频移,其频移范围为 $\pm 4\ \text{kHz}$,接收信号带宽应包含频移部分,使得两个接收频段更加接近。因此,星载接收机设计为一个,将两个频段合起来用带通采样。该整体信号的中心频率 $f'_c = 162\ \text{MHz}$, 则其最低频率 $f'_L = 161.958\ 5\ \text{MHz}$, 最高频率 $f'_H = 162.041\ 5\ \text{MHz}$, 带宽 $B' = 83\ \text{kHz}$ 。

3.2 单通道数字信号的恢复

对于采样后的数字信号,取最靠近零频的那部分频谱,并经过滤波分离信号。具体通过式(6)和式(7)两个带通滤波器可分别获得两个频段最靠近零频的信号。

$$H_1(f) = \begin{cases} 1, & -B/2 + f_{c1min} + f_d \leq |f| \leq B/2 + f_{c1min} + f_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$
 (6)

$$H_2(f) = \begin{cases} 1, & -B/2 + f_{c2min} + f_d \leq |f| \leq B/2 + f_{c2min} + f_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$
 (7)

其中:

$$f_{c1min} = \min \{ \text{mod}(f_{c1}, f_s), \text{mod}(-f_{c1}, f_s) \}$$
 (8)

$$f_{c2min} = \min \{ \text{mod}(f_{c2}, f_s), \text{mod}(-f_{c2}, f_s) \}$$
 (9)

分别为两个频段信号的中心频率,基于此可以通过去载波获得基带信号。

4 实验结果及性能分析

实验中,通过示波器接收并采样获得 AIS 船台的信号,其采集与处理仪器连接如图2所示,需要说明的是实验中没有频移。

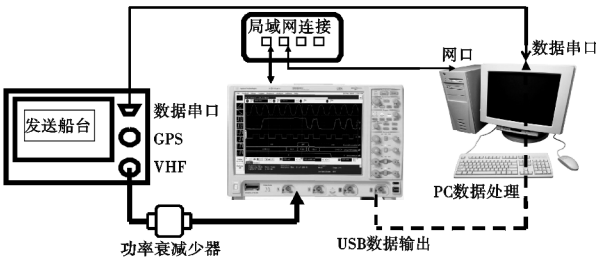


图2 AIS信号采集与处理连接示意图
Fig. 2 Connection diagram of the AIS signal's acquisition and processing

为了充分验证该方法的正确性与可行性,实验中针对不同采样频率做了实验,此处以采样频率 $f_s = 10\ \text{MHz}$ 情况结果为例说明,它是满足带通采样条件,此时最接近于零频的两个中心频率分别为1.975 MHz和2.025 MHz,对于单个船台,每个时隙只有一个信号。针对码元速率 $R_b = 9.6\ \text{kHz}$,采样率不是其整数倍问题可采用插值法解决。带通采样后信号时域波形如图3所示。

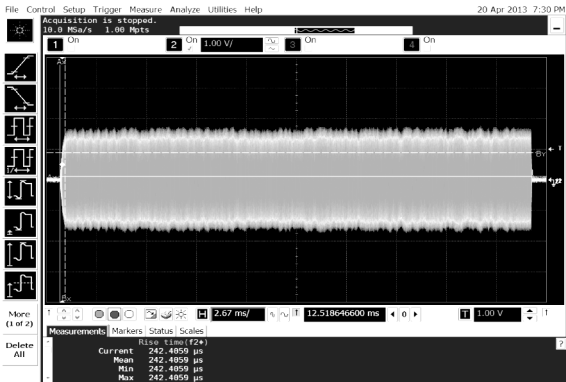


图3 示波器上 AIS 信号时域波形图
Fig. 3 Time-domain waveform on the oscilloscope of the AIS signal

图4 为上述通过示波器输出信号的频谱,从图中可以看出该信号的中心频率是2.025 MHz,验证了前面的结论。

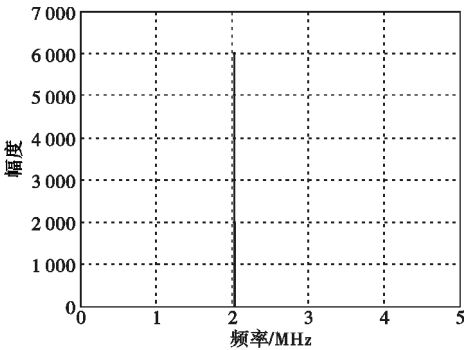


图4 示波器采集到的 AIS 信号的频谱图
Fig. 4 Spectrum of AIS signal collected by the oscilloscope

针对上述示波器上采集到的信号去载波,得到基带 AIS 信号,对其进行非相干检测,采用一种新的简化的基于 Viterbi 算法的非相干序列检测方法^[9-10],对检测得到的比特流进行 NRZI 解码,找到消息的开始标志和结束标志,提取出两个标志中间的比特流,并对提取出的比特流进行去除位填充和 FCS 校验码。根据 AIS 消息协议,每个消息的内容

是按照每 8 b 进行组合的,而且每个字节的输出从最低有效位开始,所以恢复信息时应该按 8 b 反转,才能正确恢复出信号。

根据 AIS 消息帧结构,对 AIS 解码后的信号进行恢复^[11],这样得到 AIS 信号数据部分的比特流为: 00001100 01100010 01111001 10101000 11111011 11100000 00111111 11110011 00111100 10001101 01100000 00110100 00010010 00010100 00001110 00010000 11111111 11111000 00000110 00101110 10110001。

对上面比特流进行分析可知,它是消息 3(船位报告),具体信息内容如下:

消息 ID:3(船位报告);转发指示符:默认 0 次;用户 ID(MMSI 编号):413035070;航行状态:未被定义使用;转向率 ROT AIS:0°;对地航速 SOG:1023(不可用);船位准确度:低(<10 m);经度:默认值 6791AC0h(不可用);纬度:默认值 3412140h(不可用);对地航向 COG:360°;真航向:默认值 511(不可用);报告产生的时间即时戳:60(不可用);特定操作指示符:默认值 0(未使用);备用:0;RAIM 标志:默认值 0(未使用);通信状态:处于 ITDMA 通信状态,与某基站直接同步。

5 结 论

根据卫星特定环境对模拟硬件性能提出的挑战,提出直接对接收到的射频信号进行采样,转换成数字信号进行处理。结合星载 AIS 两个发送信号载波接近,同时信号带宽较窄的特点,提出将两种载波信号视为一个窄带信号,运用带通采样定理确定采样频率,使其对两个载波的信号频谱均无混叠。运用该理论确定采样频率,通过实际船台自主发送信号,通过示波器采集信号,将采集到的数字信号通过低通滤波器,截止频率为采样频率的一半,再通过软件模块进行单通道信号的恢复,并进行解调变成基带,采用简化的基于 Viterbi 的非相干检测方法进行基带信号译码,并根据协议进行信息恢复。分别采用采样率 f_s 为 10 MHz、20 MHz、40 MHz 对实际接收到的 AIS 信号进行多次实验,其结果表明该方法均很有效,均能正确检测出发送信号,对实现 AIS 系统的全数字解调具有一定的理论参考与实际意义,但该方法对于多用户情况下信号检测结果的正确性以及优越性有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 齐青茂,王岩建,张华冲. 中频采样全数字接收机的设计与实现[J]. 无线电通信技术, 2012, 38(4): 77-80.
QI Qing-mao, WANG Yan-jian, ZHANG Hua-chong. Design and Implementation of All Digital Receiver Based on Intermediate Frequency Sampling[J]. Radio Communications Technology, 2012, 38(4): 77-80. (in Chinese)
- [2] 徐杭田,张国庆,杨占录. 软件无线电技术在舰船通信中的应用研究[J]. 电子设计工程, 2012, 20(18): 134-136.
XU Hang-tian, ZHANG Guo-qing, YANG Zhan-lu. Software Defined Radio Technology Applied in Ship Communication[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(18): 134-136. (in Chinese)
- [3] Gupta S, Gangopadhyay D, Lakdawala H, et al. A QPLL-timed direct-RF sampling band-pass SigmaDelta ADC with a 1.2 GHz tuning range in 0.13 μm CMOS[C]//Proceedings of 2011 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Baltimore, MD: IEEE, 2011: 1-4.
- [4] 潘宝凤,梁先明. 星载 AIS 接收系统设计与关键技术[J]. 电讯技术, 2011, 51(5): 1-5.
PAN Bao-feng, LIANG Xian-ming. Satellite-based AIS Receiver System Design and Related Key Techniques[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(5): 1-5. (in Chinese)
- [5] Guenter W H, Jeremie G. Status of Galileo Frequency and Signal Design [C]//Proceedings of 2002 ION GPS. Portland: IEEE, 2002: 266-277.
- [6] Betz J W. The Offset Carrier Modulation for GPS Modernization[C]//Proceedings of 1999 ION NTM. San Diego: CA: IEEE, 1999: 639-648.
- [7] 刘丽华,赵宗印. 软件无线电中的带通采样分析[J]. 无线电工程, 2007, 37(1): 26-29.
LIU Li-hua, ZHAO Zong-yin. Analysis of Bandpass Sampling in Software Defined Radio [J]. Radio Engineering, 2007, 37(1): 26-29. (in Chinese)
- [8] Zhou M, Veen A J, Leuken R. Multi-user leo-satellite receiver for robust space detection of AIS messages[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Kyoto: IEEE, 2012: 2529-2532.
- [9] Burzigotti P, Ginesi A, Colavolpe G. Advanced receiver design for satellite-based automatic identification system signal detection[J]. International Journal of Satellite Communication and Networking, 2012, 30: 52-63.
- [10] Colavolpe G, Raheli R. Noncoherent sequence detection of continuous phase modulation[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(9): 1303-1307.
- [11] 黄标,尚俊娜,陆辉. AIS 信号解调及其信息恢复

[J]. 机电工程, 2010, 27(10): 123-126.
HUANG Biao, SHANG Jun-na, LU Hui. Demodulation and information recovery of AIS signal[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(10): 123-126. (in Chinese)

作者简介:



马社祥(1962-),男,甘肃庆阳人,2002年于西安交通大学获工学博士学位,现为副教授、博士后、硕士生导师,主要研究领域为通信信号处理;

MA She-xiang was born in Qingyang, Gansu Province, in 1962. He received the Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2002.

He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research direction is communication signal processing

Email: max_x_tjut@126. com

方 婷(1989-),女,安徽安庆人,2011 年于安庆师范学院获理学学士学位,现为硕士研究生,主要研究领域为 AIS 海事通信、通信信号处理;

FANG Ting was born in Anqing, Anhui Province, in 1989. She received the B. S. degree from Anqing Teachers College in 2011. She is now a graduate student. Her research concerns AIS marine communications, communication signal processing.

Email: fangting2013@163. com

宫铭举(1978-),男,山东青岛人,2008 年于中国科学技术研究院获博士学位,现为讲师,主要研究方向为信号及信息处理;

GONG Ming-ju was born in Qingdao, Shandong Province, in 1978. He received the Ph. D. degree from Chinese Scientific and Technological Research Institute in 2008. He is now a lecturer. His research direction is signal and information processing.

Email: gmj790@sohu. com

郭 鑫(1989-),女,天津人,2012 年于天津理工大学获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为 AIS 海事通信、通信信号处理。

GUO Xin was born in Tianjin, in 1989. She received the B. S. degree from Tianjin University of Technology in 2012. She is now a graduate student. Her research concerns AIS marine communications, communication signal processing.

Email: angelbryant0824@163. com