# 快速通往量产的四个步骤:利用基于 模型的设计开发软件定义无线电

第三部分—利用硬件在环验证 S 模式信号解码算法 作者: Di Pu和Andrei Cozma

# 简介

在MATLAB或Simulink<sup>®</sup>中实现信号处理算法之后,合乎逻辑 的下一步是利用从实际要使用的SDR硬件平台获得的真实数 据验证算法的功能。首先是利用从系统获得的不同输入数据 集来验证算法。这样做有助于验证算法的功能,但不能保证 算法在其它环境条件下也能像预期那样工作,也不能确定对 于SDR系统模拟前端和数字模块的不同设置,算法的行为和 性能会如何。为了验证所有这些方面,如果能让算法在线运 行以接收实时数据作为输入,并且调整SDR系统设置以实现 最佳性能,将是非常有好处的。本系列文章的这一部分讨论 ADI公司提供的软件工具,其支持MATLAB和Simulink模型与 FMCOMMSx SDR平台直接互动,此外还会说明如何利用这 些工具验证第二部分所述的ADS-B模型<sup>2</sup>。

#### MATLAB和Simulink IIO系统对象

ADI公司提供了完整的软件基础设施来支持MATLAB和 Simulink模型与FMCOMMSx SDR平台(其连接到运行Linux的 FPGA/SoC系统)实时互动。这之所以可能,有赖于IIO System Object<sup>™3</sup>(系统对象),它设计用于通过TCP/IP与硬件系统交 换数据,从而发送(接收)数据至(自)目标,控制目标的 设置,并监测RSSI等不同目标参数。图1显示了该软件基础设 施的基本架构以及系统组件之间的数据流。



#### 图1. 软件基础设施框图

IIO系统对象基于MathWorks系统对象规范<sup>4</sup>,其公开了数据和 控制接口,MATLAB/Simulink模型通过这些接口与基于IIO的 系统通信。这些接口在一个配置文件中指定,配件文件将系 统对象接口链接到IIO数据通道或IIO属性。这样便可实现通用 型IIO系统对象,只需修改配置文件,它便能配合任何IIO平台 工作。ADI GitHub库<sup>5</sup>提供了一些平台的配置文件和示例,包括 AD-FMCOMMS2-EBZ/AD-FMCOMMS3-EBZ/AD-FMCOMMS4-EBZ/AD-FMCOMMS5-EBZ SDR 板和高速数据采集板AD-FMCDAQ2-EBZ。IIO系统对象与目标之间的通信是通过libiio 服务器/客户端基础设施来完成。服务器运行于Linux下的嵌入 式目标上,管理目标与本地/远程客户端之间的实时数据交 换。libiio库是硬件低层细节的抽象,提供了简单但完整的编 程接口,可用于绑定各种语言(C、C++、C#、Python)的高 级项目。

本文接下来将通过一些实际例子说明如何利用IIO系统对象来 验证ADS-B MATLAB和Simulink模型。一个连接到ZedBoard<sup>7</sup> 且运行Analog Devices Linux发行版的AD-FMCOMMS3-EBZ SDR平台<sup>6</sup>用作SDR硬件平台,以验证ADS-B信号检测与解码 算法是否正常工作,如图2所示。



图2. ADS-B算法验证的硬件设置

### 利用IIO系统对象验证MATLAB ADS-B算法

为了利用从AD-FMCOMMS3-EBZ SDR平台获得的实时数据 验证MATLAB ADS-B解码算法,开发了一个MATLAB脚本来 执行如下操作:

- 根据用户输入计算地球带
- 创建并配置IIO系统对象
- 通过IIO系统对象配置AD-FMCOMMS3-EBZ模拟前端和 数字模块
- 利用IIO系统对象从SDR平台接收数据帧
- 检测并解码ADS-B数据
- 显示解码的ADS-B信息

构建IIO系统对象之后,必须利用SDR系统的IP地址、目标设 备名称、输入/输出通道的大小和数目对其进行配置。图3给出 了一个创建并配置MATLAB IIO系统对象的例子。

```
% System Object Configuration
s = iio_sys_obj_matlab; % MATLAB libiio Constructor
s.ip_address = ip;
s.dev_name = 'ad9361';
s.in_ch_no = 4;
s.out_ch_no = 4;
s.in_ch_size = n;
s.out_ch_size = n;
```

s = s.setupImpl();

图3. MATLAB IIO系统对象的创建和配置

然后,利用IIO系统对象设置AD9361属性并接收ADS-B信号。AD9361属性基于以下考量而设置:

```
% Set the attributes of AD9361
if strcmp(source, 'pre-captured')
   input content(s.getInChannel('RX LO FREQ')) = 6e9;
elseif strcmp(source,'live')
   input_content(s.getInChannel('RX_LO_FREQ')) = 1.09e9;
   error('Please select a data source: pre-captured or live.');
end
input_content(s.getInChannel('RX_SAMPLING_FREQ')) = 12.5e6;
input content(s.getInChannel('RX RF BANDWIDTH')) = 4e6;
input content(s.getInChannel('RX1 GAIN MODE')) = 'fast attack';
input_content(s.getInChannel('RX1_GAIN')) = 0;
input_content{s.getInChannel('RX2_GAIN_MODE')} = 'fast_attack';
input_content(s.getInChannel('RX2_GAIN')) = 0;
input content(s.getInChannel('TX LO FREQ')) = 6e9;
input content(s.getInChannel('TX SAMPLING FREQ')) = 12.5e6;
input_content(s.getInChannel('TX_RF_BANDWIDTH')) = 4e6;
```

## 图4. MATLAB libiio 设置AD9361 属性

利用基于AD9361的平台,采样速率相当容易确定。发送数据 速率一般等于接收数据速率,最终取决于基带算法。本例 中,解码算法是针对12.5 MSPS的采样速率而设计,AD9361 采样速率据此设置。这样,接收到的样本便可直接应用于解 码算法,无需其它抽取或插值操作。 RF带宽控制设置AD9361 RX模拟基带低通滤波器的带宽,以 提供抗混叠和带外信号抑制。为了成功解调收到的信号,系统 必须最大程度地提高信噪比 (SNR)。因此,在满足平坦度和带 外抑制要求的同时,RF带宽必须设置得尽可能窄,以使带内 噪声和杂散信号电平最小。如果RF带宽设置得较宽,ADC线 性动态范围就会因为额外的噪声而缩小。同样,ADC无杂散 动态范围也会因为较低的带外信号抑制而缩小,导致接收器的 整体动态范围缩小。因此,将RF带宽设置为最优值对于接收 所需的带内信号并抑制带外信号非常重要。通过观察接收信号 的频谱,我们发现4 MHz是一个合适的RF带宽值。

除了通过RF带宽属性设置AD9361的模拟滤波器之外,我们还可以通过IIO系统对象使能AD9361的数字FIR滤波器以改善解码性能,如图5所示。根据ADS-B信号的频谱特性,我们设计一个数据速率为12.5 MSPS、通带频率为3.25 MHz、阻带频率为4 MHz的FIR滤波器。这样,我们就能进一步聚焦于目标带宽。

#### s.writeFirData('adsb.ftr');

## 图5. 通过libiio使能AD9361的适当FIR滤波器

Adsb.ftr文件包含FIR滤波器的系数,该FIR滤波器利用ADI公司AD9361滤波器向导MATLAB应用程序设计<sup>8</sup>。此工具不仅能完成通用低通滤波器设计,还能为信号路径中的其它级提供幅度和相位均衡。



图6. 利用MATLAB AD9361 滤波器向导设计的用于ADS-B信号的FIR 滤波器

多功能且高度可配置的AD9361收发器具有多种增益控制模 式,适合很多不同的应用。IIO系统对象的Gain Mode(增益 模式)参数选择可用模式之一: manual、slow attack、hybrid 和 fast attack 。 最常用的模式是 manual 、 slow attack 和 fast attack。Manual增益控制模式允许基带处理器 (BBP) 控制 增益。Slow attack模式主要用于慢速变化的信号, fast attack 模式主要用于"突发"开启和关闭的波形。增益模式在很大程 度上取决于接收信号的强度。如果信号太强或太弱,建议使 用manual或slow attack模式。否则, fast attack是不错的选 择。ADS-B信号具有突发性,因此fast attack增益模式可实现 最佳效果。这种波形要求使用fast attack模式,因为其存在前 同步码,并目AGC需要以足够快的速度响应以便捕捉第一 位。没有信号时,启动时间(增益斜坡下降所需的时间)与 衰减时间(提高增益所需的时间)存在差异。目标是快速调 低增益,以便能在第一位看到一个有效的1,但不提高位时间 之间的增益。

最后,根据您对TX\_LO\_FREQ和RX\_LO\_FREQ的设置,该模型有两种使用方式:使用预先捕捉的数据(RF回送)和使用从空中获得的实时数据。

#### 预先捕捉数据

这种情况下,我们利用AD-FMCOMMS3-EBZ发送和接收预先 捕捉到的一些ADS-B信号。这些信号保存在一个名为 "newModeS"的变量中。

input\_content(1) = (2^13).\*newModeS./sqrt(2); input\_content(2) = (2^13).\*newModeS./sqrt(2); input\_content(3) = (2^13).\*newModeS./sqrt(2); input\_content(4) = (2^13).\*newModeS./sqrt(2);

### 图7. 利用预先捕捉的ADS-B信号定义输入

这种情况要求TX\_LO\_FREQ = RX\_LO\_FREQ,它可以是AD-FMCOMMS3-EBZ支持的任意LO频率值。预先捕捉的数据中有大量ADS-B有效数据,因此,这是验证硬件设置是否合适的好方法。

#### 实时数据

这种情况下,我们接收空中的实时ADS-B信号,而不是AD-FMCOMMS3-EBZ发送的信号。根据ADS-B规范,它以1090 MHz的中心频率发送,因此,这种情况的要求是:

- RX\_LO\_FREQ=1090 MHz, TX\_LO\_FREQ 远离 1090 MHz, 以免产生干扰。
- 在接收侧使用一根适当的天线,它能覆盖1090 MHz频段,例如ADS-B双半波移动天线<sup>9</sup>,使用调谐不佳或制作不良的天线会导致空中雷达探测距离不够。

一切设置妥当之后,使用如下命令便可运行MATLAB模型: [rssi1,rssi2]=ad9361\_ModeS('ip','data source',channel);

其中, *ip*为FPGA板的IP地址, *data source*指定接收信号的数据 源。目前,该模型支持"预先捕捉"的数据源和"实时"数据源。 *Channel*指定信号是利用AD-FMCOMMS3-EBZ的通道1还是通 道2进行接收。

例如,发出以下命令时,系统将通过通道2接收预先捕捉的数据:

[rssi1,rssi2]=ad9361\_ModeS('192.168.10.2','pre-captured',2);

在仿真结束时,您会得到两个通道的RSSI值以及下表所示的结果:

3	🖬 🍪   🗞   🧐	. < <) >							
	Aircraft ID	Altitude	N/Svel	E/W vel	Lat	Lorg U/	D vel Flight ID	Time	
1	A72C78	21300	-63	-381	42.10	-71.45 1856	AAL1899	13:18:40	E
2	A0433B							13:18:14	E
3	A24C99							13:18:07	E
4	A482CA	38975	-367	-131	42.12	-71.260	AAL235	13:18:36	E
5	A4E82C	25000	-202	-166	42.15	-71.080		13:18:41	V
6	AB324A							13:18:40	E
1	A29EB6							13:18:12	E
8	4CAAFA	39000	-375	-133	42.45	-71.090		13:18:38	E
9	AB184D							13:18:34	E
0									E

#### 图8. 仿真结束时显示的结果表格

此结果表格显示了仿真期间出现的航空器信息。借助适当 的天线,此模型利用AD-FMCOMMS3-EBZ能够捕捉并解码 80英里范围内的航空器信号。S模式消息有两类(56 μs和 112 μs),因此,某些消息包含的信息比其它消息要多。

利用实际ADS-B信号测试此模型时,解码能否成功,信号强 度非常重要,务必把天线放在对准航空器的良好位置上。接 收信号强度可通过查看两个通道的RSSI值来了解。例如,若 通过通道2接收信号,通道2的RSSI应显著高于通道1的RSSI。 通过查看频谱分析仪,可以判断是否存在有用数据。

#### RF信号质量

任何RF信号都需要一个质量指标。例如,对于QPSK等信号,我们有误差矢量幅度(EVM)。对于ADS-B信号,查看分隔器输出还不足以获得正确消息,如图8所示。我们需要一个指标来定义ADS-B/脉冲位置调制的质量,以便判断哪种设置更好。

ModeS\_BitDecode4.m函数中有一个变量*diffVals*,它就可以用 作这样的指标。此变量是一个112×1矢量。对于一条S模式消 息中的每个解码位,它都会显示该位距离阈值有多远。也就 是说,每个解码位相对于正确判断有多少裕量。显而易见, 一个位的裕量越大,解码结果的置信度就越高。另一方面, 若裕量很小,则意味着判断处于边缘区,解码位很有可能是 错误的。 下面两幅图比较了有和没有FIR滤波器两种情况下从ADS-B接 收器获得的diffVals值。注意y轴,我们发现,使用FIR滤波器 时,无论处于最高点、最低点还是平均值,diffVals都较大。 然而,当没有FIR滤波器时,几个位的diffVals都非常接近0, 意味着解码结果可能不正确。因此,我们可以得出结论,使 用适当的FIR滤波器可改善解码的信号质量。









采用IIO系统对象的MATLAB ADS-B算法可从ADI GitHub库下载<sup>10</sup>。

#### 利用IIO系统对象验证Simulink ADS-B算法

Simulink模型基于本系列文章第二部分介绍的模型<sup>2</sup>。解码器 和解码模块直接来自该模型,我们增加了Simulink IIO系统对 象以开展信号接收和硬件在环仿真。

原始模型以采样时间 = 1且帧大小 = 1的设置工作。然而, Simulink IIO系统对象以缓冲模式工作,它会积累若干样本, 然后进行处理。为了让原始模型配合系统对象工作,我们在 其间增加了两个模块:解除缓冲以使帧大小 = 1,转换速率以 使采样时间 = 1。这样,原始模型便可保持不变。

Simulink IIO系统对象设置如下。与MATLAB实例相同,它创 建一个系统对象,然后定义与此系统对象相关的IP地址、设 备名称、输入/输出通道数目和大小。

🔁 Function Block Parameters: MATLAB System									
iio_sys_obj									
Copyright 2014-15(c) Analog Devices, Inc.									
Source code									
Parameters									
IP address:	192.168.10.2								
Device name:	ad9361								
Number of input data channels:	2 1e6 2								
Input data channel size [samples]:									
Number of output data channels:									
Output data channel size [samples]:	1e6								
Simulate using: Interpreted execution									
OK Cancel Help Apply									

图12. Simulink IIO系统对象



图11. Simulink模型捕捉和解码ADS-B信号

模拟对话 49-11, 2015 年 11 月

与IIO系统对象相对应,此Simulink模块的输入输出端口通过 对象模块的属性对话框以及目标ADI SDR平台特定的配置文 件来定义。输入和输出端口按数据和控制端口分类。数据端 口以帧处理模式发送(接收)连续数据缓冲至(自)目标系 统,而控制端口则用于配置和监控不同的目标系统参数。数 据端口的数目和大小通过该模块的配置对话框进行配置,而 控制端口则在配置文件中定义。AD9361属性设置所依据的因 素与MATLAB模型所述相同。MATLAB模型运用的所有理论 和方法在这里都适用。

根据您对TX\_LO\_FREQ和RX\_LO\_FREQ的设置, Simulink模型有两种运行模式:使用预先捕捉的数据"DataIn"和使用实时数据。以预先捕捉的数据为例,在仿真结束时,我们可以在命令窗口中看到如下结果:

Aircraft ID 400927 Long Message CRC: 8D40092760C38037389C0EF0029C Aircraft ID 400927 is at altitude 39000 Aircraft ID 400927 is at latitude 42 19 24.8, longitude -71 8 33.3 Aircraft ID 400927 Long Message CRC: 8D4009279944E7B320048CDB40FA Aircraft ID 400927 is traveling at 468.363107 knots Direction West at 230.000000 knots, direction South at 408.000000 knots Aircraft ID 400927 is going Up at 0.000000 feet/min

图13. 使用预先捕捉数据的仿真结束时在命令窗口中显示的结果

这里的结果以文本格式显示,而不像在MATLAB模型中以表 格形式显示。

采用IIO系统对象的Simulink ADS-B模型可从ADI GitHub库 下载<sup>11</sup>。

## 结论

本文讨论了利用ADI公司提供的libiio基础设施进行的硬件在 环仿真。采用这种基础设施,便可利用实际信号和硬件验证 MATLAB和Simulink ADS-B信号检测与解码算法。属性设置 高度依赖于应用和波形,适合一个波形的设置并不一定适合 另一个波形。这是关键的一步,可确保SDR系统的模拟前端 和数字模块针对目标算法和波形调谐妥当,并且算法足够鲁 棒,对于不同环境条件下获得的实际数据,它都能像预期的 那样处理。有了经过验证的算法之后,便可开始下一步,即 利用MathWorks代码自动生成工具将算法转换为HDL和C代 码,并将此代码集成到实际SDR系统的可编程逻辑和软件当 中。本系列文章的下一部分将说明如何生成代码并将其部署 到生产硬件中,还会谈谈该平台在机场利用实际ADS-B信号 运行所获得的结果。这样便介绍完了SDR系统从原型开发到 生产的所有步骤。

## 参考文献

- <sup>1</sup> Andrei Cozma、Di Pu和Tom Hill。"快速通往量产的四个 步骤:利用基于模型的设计开发软件定义无线电—第一部 分"。*模拟对话*,第49卷第3期,2015年。
- <sup>2</sup> Mike Donovan、Andrei Cozma和Di Pu。"快速通往量产的四个步骤:利用基于模型的设计开发软件定义无线电—第二部分"。*模拟对话*,第49卷第4期,2015年。
- <sup>3</sup> ADI公司。"IIO系统对象"。
- <sup>4</sup> MathWorks。"什么是系统对象?"
- <sup>5</sup> ADI公司, "Mathworks\_tools"。GitHub库。
- <sup>6</sup> ADI公司。AD-FMCOMMS3-EBZ用户指南。
- <sup>7</sup> ZedBoard<sub>o</sub>
- <sup>8</sup> ADI公司。MATLAB AD9361滤波器设计向导。
- 9 ADS-B双半波移动天线。
- <sup>10</sup>采用IIO系统对象源代码的MATLAB ADS-B算法。
- <sup>11</sup>采用IIO系统对象源代码的Simulink ADS-B模型。

## 致谢

感谢MathWorks公司的Mike Donovan,他帮助开发了本文所 用的MATLAB和Simulink ADS-B信号检测与解码算法。



Di Pu [di.pu@analog.com]是 ADI 公司系统建模应用工程师,负责支持软件定义无线电平台和系统的设计与开发。她与 MathWorks 密切合作解决 双方共同客户的难题。加入 ADI 公司之前,她于 2007 年获得南京理工大学 (NJUST) 电气工程学士学位,于 2009 年和 2013 年分别获得伍斯特理 工学院 (WPI) 电气工程硕士学位和博士学位。她是 WPI 2013 年博士论文 Sigma Xi 研究奖获得者。

Andrei Cozma [andrei.cozma@analog.com]是 ADI 公司工程设计经理, 负责支持系统级参考设计的设计与开发。他拥有工业自动化与信息技术 学士学位及电子与电信博士学位。他参与过电机控制、工业自动化、软 件定义无线电和电信等不同行业领域的项目设计与开发。



该作者的其它文章: 基于FPGA的系统提高电机控制性能 第49卷第1期

