Vol. 13/ Issue. 3/ 2020 (No.44)
pp.17-24
10.30699/JSST.2020.1174
JSST
Journal of Space Science & Technology

Research Paper

Design, Implementation and Test of Acoustic Data Acquisition Subsystem for Space Bio-Capsule of PajoheshExplorer

Peyman Aliparast[1]

Department of Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

*** aliparast@ari.ac.ir**

*This paper present the design, implementation and test of 24-bit acoustic DAQ subsystem for bio-capsule of Pajohesh explorer. The proposed structure has been used B&K 4942 microphone as the input sensing element. The proposed DAQ has 48Ksps speed, 24-bit resolution, 113dB dynamic range and 23 kHz BW. we used an ARM Cortex M3 for signal handling and processing. The acquiescing data have been sending to Bio-capsule FC and also recorded in a Micro-SD card. Power consumption of the proposed DAQ is obtained at 2.8W. The proposed DAQ takes place with dimensions of 40*40*100 mm3 inside the bio-capsule stand.*

Keywords: Acoustic, Analog to digital converter, Microphone , Bio-capsule

1Assistant Professor

Received: 2019.01.30 / Accepted: 2020.01.28 /Publish Online: 2020.09.22/ Online ISSN: 2423-4516 / Print ISSN: 2008-4560

JSST
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضایی

دوره ۱۳ / شمارهٔ ۳/ پاییز ۱۳۹۹ (شماره پیاپی ۴۴) 10.30699/JSST.2020.1174
ص. ص . ۲۴- ۱۷

مقاله علمی– پژوهشی

طراحی، ساخت و تست زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیک برای کپسول زیستی کاوشگر پژوهش

پیمان علی‌پرست[۱*]

۱- پژوهشکده سامانه‌های فضانوردی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

***aliparast@ari.ac.ir**

در این مقاله طراحی، ساخت و تست زیرمجموعه ثبت داده‌های آکوستیک ۲۴ بیتی برای کپسول زیستی کاوشگر پژوهش تشریح می‌شود. زیرمجموعه طراحی شده از حسگر آکوستیک ۴۹۴۲ شرکت بی اند کی استفاده و اطلاعات خوانده شده را به جهت افزونگی در یک کارت میکرو اس دی ذخیره می‌نماید. سرعت نمونه‌گیری ۴۸,۰۰۰ نمونه در ثانیه و پهنای باند زیرمجموعه ثبت داده ۴ تا ۲۳ کیلو هرتز اندازه‌گیری شده است. با توجه به محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی، رنج دینامیکی در حدود ۱۱۳دسی بل اندازه‌گیری شده است که منجر به تشخیص سیگنال‌های آکوستیکی مابین ۲۷ دسی بل تا ۱۴۰ دسی بل می‌شود. جهت پردازش، انتقال اطلاعات و ذخیره‌سازی از پردازنده آرم کورتکس ام ۳ استفاده شده است. با توجه به حجم داده استخراج شده، سرعت ذخیره‌سازی ۳ مگابیت بر ثانیه است. توان مصرفی کل زیرمجموعه آکوستیک به همراه حسگر آکوستیک و برد تأمین توان، ۲/۸ وات اندازه‌گیری شده است. ابعاد نهایی زیرمجموعه ۱۰۰ در ۴۶ در ۴۰ میلی متر مکعب است.

واژه‌های کلیدی: آکوستیک، داده‌بردار، طراحی و ساخت، مبدل آنالوگ به دیجیتال، ثبت اطلاعات، میکروفون، کاوشگر فضایی، کپسول زیستی فضایی

علائم و اختصارات

مقدار مؤثر نویز حاشیه	Fn
مقدار مؤثر حداکثر دامنه ولتاژ ورودی	Vm
مقدار گستره دینامیکی	DR
مقدار مؤثر توان سیگنال اندازه‌گیری شده	S
مقدار مجموع اعوجاج هارمونیکی	D
توان مؤثر نویز	N
مقدار نسبت سیگنال به نویز و اعوجاج	Sn
دامنه سیگنال ورودی (خروجی سنسور)	Vs
تعداد بیت‌های مؤثر	En

مقدمه

در آذر سال ۱۳۹۲ شمسی، کاوشگر پژوهش دومین میمون فضایی ایران را به ارتفاع ۱۲۵ کیلومتری زمین حمل کرد. شکل (۱) کاوشگر پژوهش آماده ارسال به فضابر روی سکوی پرتاپ را نمایش می‌دهد. کاوشگر پژوهش مجهز به یک کپسول زیستی جهت حمل موجود زنده به فضا بود [۱]. در طول مأموریت‌های فضایی، موجود زنده در درون کپسول زیستی در معرض فشارهای آکوستیکی شدیدی در فازهای مختلف پرواز قرار می‌گیرد. بنابراین، لازم است از سلامت موجود زنده اطمینان حاصل‌شده و شرایط مناسب محیطی تحقق یابد. یکی از موارد تحقق شرایط محیطی مناسب، سلامت شنوایی موجود زنده در طول مأموریت است. تأمین صحیح این شرایط، نیازمند اندازه‌گیری پارامترهای محیطی از جمله سطح فشار آکوستیک در داخل کپسول است.از این‌رو، لازم است که یک سیستم داده‌برداری منطبق بر سنسورهای آکوستیکی دقیق، طراحی، ساخته و در داخل کپسول زیستی فضایی تعبیه شود [۲، ۳].

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۰ ، پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸ / چاپ الکترونیکی: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱ / شاپای الکترونیکی: ۴۵۱۶-۲۴۲۳ / شاپای چاپی: ۴۵۱۶-۲۰۰۸

الزامات طراحی

الزامات طراحی زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی کپسول زیستی کاوشگر پژوهش را می‌توان به سه دسته الزامات فنی، الزامات الکترونیکی و الزامات کیفی تقسیم کرد. در جدول (۱) این الزامات تشریح شده‌اند [۴]. شایان ذکر است که الزامات طراحی براساس استاندارد ۶۱۰۵ مهندسی سیستمی ناسا[2]، توسط گروه مهندسی سیستم استخراج و در قالب ماتریس الزامات طراحی به زیرمجموعه ارجاع می‌شود [۱۶]. همچنین، در طراحی زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی از استاندارد تی ام ۲۱۷۸۱۱ ناسا استفاده شده است [۱۵].

شکل ۱- کاوشگر پژوهش

جدول ۱- الزامات طراحی زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی کاوشگر پژوهش

الزامات فنی	
۱	زیرمجموعه باید توانایی ثبت و ذخیره پارامترهای مربوط به حسگرصوتی را داشته باشد.
۲	زیرمجموعه باید توانایی ارسال پارامترهای مربوطه را داشته باشد.
۳	زیرمجموعه و اجزای آن باید به صورت ماژولار ساخته شود.
۴	زیرمجموعه باید دارای قابلیت افزونگی باشد.
۵	زیرمجموعه باید حداقل دارای یک پشتیبان باشد.
۶	زیرمجموعه باید قابلیت تست مستقل داشته باشد.
۷	زیرمجموعه باید درون محفظه با ابعاد تقریبی به صورت میلی‌متر مکعب ۱۲۰×۶۰×۴۰، مقاوم در برابر اغتشاشات مکانیکی باورودی خروجی‌های تعیین‌شده تست و تحویل داده شود.
الزامات الکترونیکی	
۱	این واحد باید قابلیت داده‌برداری در بازه فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را داشته‌باشد.
۲	حداقل نرخ نمونه‌برداری برابر با ۴۸,۰۰۰ نمونه بر ثانیه باشد.
۳	سامانه باید قابلیت ثبت امواج آکوستیکی با حداکثر سطح فشار آکوستیک ۱۴۰ دسی‌بل را داشته باشد.
۴	داده‌برداری باید با رزولوشن ۲۴ بیت صورت گیرد.
۵	سامانه باید تا حداقل ۱ ساعت قابلیت ضبط داده را داشته باشد. زمان شروع داده‌برداری باید قابل کنترل توسط کاربر از بیرون محفظه باشد.
۶	اطلاعات ذخیره شده در سامانه باید به راحتی قابل انتقال به کامپیوتر باشد.
	الزامات کیفی
۱	سامانه باید تست‌های عملکردی را با موفقیت پشت سر گذارد.
۲	سامانه باید تست‌های محیطی شامل ارتعاش تصادفی، ارتعاش سینوسی، شوک مکانیکی، شتاب، دما بالا، دما پایین؛ را با موفقیت پشت سر گذارد.
۳	تمامی تست‌های محیطی بایستی در حین عملکرد سامانه انجام پذیرد.

با درنظر گرفتن موارد فوق، طرح پیشنهادی می‌بایستی تمامی الزامات طراحی را به عنوان سند بالادستی محقق سازد.

طراحی زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی

با درنظر گرفتن الزامات طراحی، شکل (۲) بلوک دیاگرام ساختار پیشنهادی را برای تحقق زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی نمایش می‌دهد. مطابق با شکل (۲)، ورودی زیرمجموعه ثبت آکوستیک یک حسگر آکوستیکی می‌باشد که امواج مکانیکی را تبدیل به سیگنال الکتریکی می‌نماید. سیگنال الکتریکی توسط بافر ورودی به ولتاژ مطلوب گسترهٔ کامل در ورودی مبدل آنالوگ به دیجیتال تبدیل می‌شود و در نهایت دادهٔ دیجیتالی متناظر فشار آکوستیکی جهت پردازش در اختیار یک پردازندهٔ مرکزی قرار می‌گیرد. این پردازنده به صورت آسنکرون و به همراه سیگنال‌های کنترلی از طریق درگاه سریال، با رایانهٔ مرکزی کپسول زیستی در ارتباط می‌باشد. همچنین، پردازنده به عنوان افزونگی[3] داده را بر روی یک کارت حافظه ذخیره می‌نماید. همچنین، واحد توان وظیفهٔ تأمین توان مصرفی تمامی مجموعه‌ها را بر عهده دارد. حسگر آکوستیکی مطلوب با توجه به الزامات سیستمی اندازه‌گیری فشارهای آکوستیک تعیین می‌شود. بدین منظور از یک میکروفون پیش پلاریزه فضای بسته[4] استفاده شده است. این نوع حسگر طوری طراحی شده استکه در برابر سیگنال‌هایی که از همه جهات به طور هم زمان به آن می‌رسد، پاسخی مسطح داشته باشد. بنابراین، در اندازه‌گیری‌هایی که بیش از یک منبع تأثیرگذار وجود دارد، به کار می‌رود. مانند اندازه‌گیری در داخل اتاق که صدا توسط دیوارها، سقف و اشیاء منعکس می‌شود. این حسگر آکوستیک که با نام تجاری ۴۹۴۲ شناخته می‌شود دارای مشخصات فنی به شرح ذیل می‌باشد:

2. NASA

3. Redundancy
4. Prepolarized Diffuse-Field Microphone

- حساسیت: ۵۰ میلی ولت بر پاسکال
- فرکانس: ۶/۳ تا ۱۶,۰۰۰ هرتز
- گستره دینامیکی : ۱۴/۶ تا ۱۴۶ دسی بل
- دما: ۴۰- تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد

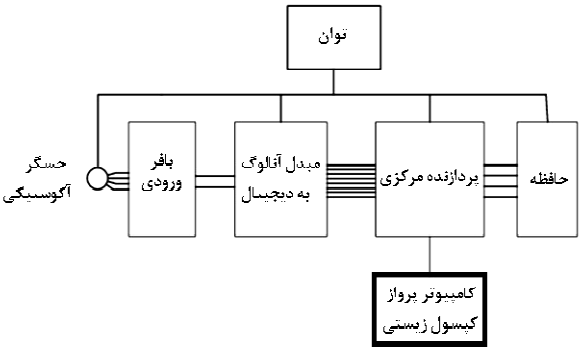
برای راه‌اندازی این حسگر از یک طبقه درایور به‌منظور واحد پیش‌تقویت‌کننده کم نویز استفاده شده است. همچنین، واحد تقویت ۲۶۶۹ از محصولات شرکت بی‌اندکی[5] بوده و همانند غلاف میکروفون بر روی آن قرار می‌گیرد. شکل (۳) میکروفون و درایور استفاده شده را نمایش می‌دهد. در شکل (۴) پاسخ فرکانسی حسگر ۴۹۴۲نمایش داده شده است[۵]. با درنظرگرفتن پهنای باند حدود ۲۰ کیلوهرتزی این حسگر، نمونه‌برداری با توجه به رابطه شانون- نایکویست می‌بایستی بیش از ۴۰ هزار نمونه در ثانیه باشد. از طرفی، با توجه به گسترهٔ دینامیکی میکروفون که ۱۳۱/۴ دسی بلاست، نیاز به یک مبدل آنالوگ به دیجیتال حداقل ۲۲ بیتی داریم، زیرا:

$$131.4dB=20\log\alpha \quad (۱)$$

$$\alpha=2^{x} \quad (۲)$$

$$x=21.82 \quad (۳)$$

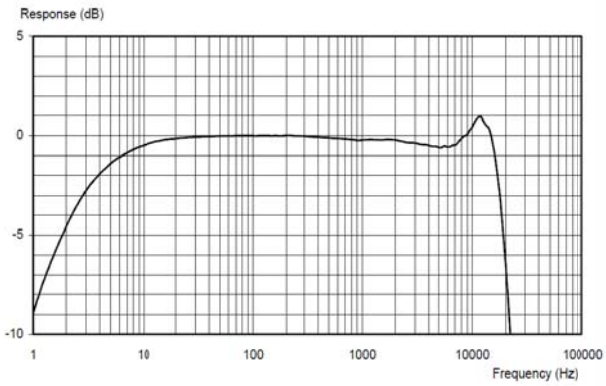
با توجه به رابطهٔ (۳) و این موضوع که تعداد بیت‌ها می بایستی عدد صحیح باشد، حداقل ۲۲ بیت نیاز خواهیم داشت [۶]. بنابراین، این دو شاخص الزام سنگینی را بر مبدل آنالوگ به دیجیتال تحمیل می‌کند و به‌رغم پیشرفت‌های حوزه میکروالکترونیک، شاید تعداد تراشه‌های مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال که بتوانند دقت ۲۴ بیت را با سرعت نمونه‌گیری بالای ۴۸,۰۰۰ نمونه بر ثانیه تحقق بخشند کمتر از تعداد انگشتان دو دست باشد.



شکل ۲- بلوک دیاگرام ساختار پیشنهادی زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی

5. B&K

شکل ۳- میکروفون و درایورزیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی (حسگر ۴۹۴۲ و درایور ۲۶۶۹ شرکت بی اند کی)



شکل ۴- پاسخ فرکانسی حسگر ۴۹۴۲ [۵]

جدول (۲) یک مقایسه خلاصه شده از چند ویژگی سه مبدل آنالوگ به دیجیتال مطرح را نمایش می‌دهد [۹-۷]. مطابق با جدول (۲)، تراشهٔ CS5381 دارای مزایایی همچون پایداری بیشتر نسبت به نویز خارجی، خطینگی بالاتر، ولتاژ مرجع و بانک فیلتر دیجیتالی داخل تراشه و همچنین توانایی تحمل شرایط محیطی سخت‌تر را دارد. بنابراین، تراشهٔ مبدل آنالوگ به دیجیتال CS5381 از شرکت سیروس[6] انتخاب شد. CS5381 از یک سو به پردازنده و از سویی دیگر به مدار بافر ورودی متصل شده است. تراشهٔ مبدل آنالوگ به دیجیتال خروجی‌های مختلفی به ما ارائه می‌دهد که ما از خروجی I_2S[7] جهت اتصال به پردازنده استفاده شده است. پروتکل I_2S یک پروتکل سه‌سیمه برای منتقل‌کردن داده به صورت سریال می‌باشد که داده موجود معمولاًمربوط به صدای دیجیتال است [۱۰، ۱۱].

6. Cirrus
7. Inter-IC Sound

از سویی دیگر، با توجه به حجم داده‌ها که حداقل ۲۴ بیتی خواهند بود (به‌دلیل دامنهٔ گسترهٔ دینامیکی میکروفون) و با در نظر گرفتن افزونگی و سرآیند آدرس[8] می‌بایستی یک پردازنده ۳۲ بیتی برای مجموعه ثبت داده پیشنهادی در نظر بگیریم. در حال حاضر، برترین پردازنده‌ها با توان مصرفی پایین، کارایی بالا و ۳۲ بیتی از نوع آرم[9] می‌باشند. یکی دیگر از مزایای پردازندهٔ‌آرم، تجهیز این تراشه‌ها به پورت I_2Sمخصوص انتقال سریع داده‌های آکوستیک می‌باشد. با درنظر گرفتن مزیت‌های مذکور تراشه میکروکنترلر آرم سری کورتکس ام[10] با مشخصه LPC1768 انتخاب شد [۱۲]. جهت افزونگی ذخیره‌سازی بر روی برد نیز از یک کارت حافظه میکرو اس دی[11] استفاده شد. با توجه به نرخ نمونه‌برداری ۴۸,۰۰۰ نمونه بر ثانیه (براساس الزام جدول ۱) و در نظر گرفتن دو کانال داده‌برداری موازی که هر کانال اقدام به ثبت داده ۳۲ بیتی می‌نماید (۲۴ بیت داده آکوستیک خام بعلاوه یک بایت سرآیند[12])، برای پهنای باند خط انتقال سریال خواهیم داشت:

$$48KS/s \times 32\ bit \times 2 = 2.93\ Mb/s \quad (۴)$$

$$3600 \times 2.93\ Mb/s = 1.29\ GB \quad (۵)$$

با توجه به رابطهٔ (۴) کارت حافظه میکرو اس دی انتخابی می‌بایستی حداقل از نوع کلاس ۶ بوده و با در نظر گرفتن توانایی بیش از یک ساعت ثبت اطلاعات (براساس الزام جدول ۱)، نیاز به حداقل ۲ گیگابایت ظرفیت حافظه با توجه به رابطهٔ (۵) دارد. اندازه کارت‌های میکرو اس دی ۱۱×۱۵ میلی مترمربع است و معمولا در تلفن‌های همراه استفاده می‌شوند. اندازه بسیار کوچک به همراه مقاومت فیزیکی مناسب در برابر شرایط محیطی سخت از مزایای این نوع از حافظه‌ها هستند. توان زیرمجموعه ثبت داده‌های آکوستیک از طرف سامانه تأمین توان کاوشگر تأمین و بصورت یک ولتاژ ۲۸ ولت به همراه سیگنال‌های کنترلی، در اختیار زیرمجموعه قرار می‌گیرد. ولتاژ ۲۸ ولت برای استفاده در مدار ثبت آکوستیک، بایدبه ولتاژهای ۵ ولت و ۱۵± ولت تبدیل شود. این کار توسط ۲ عدد مبدل ولتاژ به ولتاژ دی سی[13] به دی سی انجام می‌شود. مبدل‌های ولتاژ مورد استفاده از خانواده MDWI03 ساخت شرکت مین ماکس[14] می‌باشند. این مبدل‌های ولتاژ در گروه ۲۴ ولت دارای ورودی ولتاژ ۹ تا ۳۶ ولت هستند. این بازه ورودی بسیار وسیع به حساب می‌آید.

جدول ۲- مقایسهٔ برخی ویژگی های مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال

ویژگی	مشخصات مبدل آنالوگ به دیجتال		
	AD7760	CS5381	PCM4222
سرعت نمونه‌برداری	۲/۵ مگاهرتز	۱۹۲ کیلوهرتز	۲۱۶ کیلوهرتز
گستره دینامیکی	۱۲۰ دسی بل در فرکانس ۷۸ کیلوهرتز	۱۲۰ دسی بل در فرکانس ۱۹۲ کیلوهرتز	۱۲۳ دسی بل در فرکانس ۱۹۲ کیلوهرتز
نسبت سیگنال به نویز (SNR[15])	۱۱۲ دسی بل در فرکانس ۷۸ کیلوهرتز	بهتر از ۱۱۰ دسی بل در کل پهنای باند	بهتر از ۱۲۴ دسی بل در کل پهنای باند
مجموع نویز و اعوجاج هارمونیک‌ها (THD+N[16])	-۱۰۶ دسی بل	-۱۱۰ دسی بل	-۱۰۸ دسی بل
نوع ورودی	تفاضلی	تفاضلی	تفاضلی
تعداد ورودی	۱	۲	۲
رابط خروجی	موازی ۱۶ بیت[17]	I_2S	PCM/TDM/I_2S
سطح ولتاژ رابط خروجی	۱/۶۵ تا ۲/۷ ولت	۲/۴ تا ۳/۶ ولت	۲/۳۷ تا ۵/۲۵ ولت
ولتاژ ورودی تمام مقیاس	۴ یا ۶/۵ ولت	۵/۶۵ ولت	۵/۶ ولت
تقویت کننده	داخلی	خارجی	خارجی
فیلتر دیجیتال	داخلی	داخلی	داخلی
ولتاژ مرجع	خارجی	داخلی	داخلی
منبع کلاک	خارجی	خارجی	خارجی
تعداد ولتاژ تغذیه مورد نیاز	۶	۳	۳
پکیج	TQFP-64	TSSOP/SIOC-24	TQFP-48
دمای قابل تحمل	-۴۰ تا ۸۵ °C	-۵۰ تا ۹۵ °C	-۴۰ تا ۸۵ °C
حد اقل لایه PCB مورد نیاز	۴	۲	۴

ورودی وسیع، به دلیل ایجاد خروجی پایدار در برابر تغییرات وسیع ولتاژ از ۹ تا ۳۶ ولت، از طرفی باعث بهبود کاربری و از طرف دیگر افزایش قابلیت اطمینان استفاده از این قطعه می‌شود. برای ولتاژ خروجی ۵ ولت از MDWI03-24S05 استفاده شده است. این مبدل ولتاژ توانایی تأمین جریان حداکثری ۶۰۰ میلی‌آمپر را دارد. برای ولتاژ خروجی ۱۵± ولتاژ MDWI03-24D15 استفاده شده است. حداکثر جریان خروجی این مبدل نیز حدود ۱۰۰±میلی‌آمپراست.خروجی مبدل‌ها توسط دیودهای زینر محافظت شده است. ولتاژ بخش آنالوگ

8. Address Header
9. ARM
10. CortexM
11. SanDisk (SD)
12. Header
13. DC to DC
14. MINMAX
15. Signal to Noise Ratio
16. Total Harmonic Distortion
17. Bit

و دیجیتال توسط فریت L2 به یکدیگر متصل می‌شوند تا مانع از انتشار نویز دیجیتال به بخش آنالوگ شود. جریان مصرفی از منبع ولتاژ تغذیه سامانه خدمات حداکثر ۱۰۵ میلی‌آمپر است. مکان هر مبدل براساس محل ولتاژ مورد نیاز جانمایی شده است. به گونه‌ای که مبدل ولتاژ ۵ ولت به منطقه با نیاز ولتاژ ۵ ولت نزدیک و مبدل ولتاژ ۱۵± ولت نیز به منطقه با نیاز ۱۵± ولت مجاور است. علاوه بر منطقه ولتاژی، کاهش تداخل نویز، توزیع وزن بورد الکترونیکی برای مسائل مکانیکی- ارتعاشی و توزیع دمایی نیز از ملاحظات جایگذاری مبدل‌های ولتاژ می‌باشد. یکی دیگر از مهمترین بخش‌های زیرمجموعه داده‌برداری آکوستیک بافر ورودی می‌باشد. عملکرد و کارآیی این بخش، عملکرد و کارآیی کل زیرمجموعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مشکل عمده‌ای که در اتصال پیش تقویت‌کننده به مبدل آنالوگ به دیجیتال وجود دارد این است که سیگنال خروجی پیش تقویت‌کنندهٔ تک سر[18] است، در صورتی که مبدل ورودی تفاضلی قبول می‌کند. بنابراین، برای اتصال این سیگنال خروجی به مبدل باید از یک راه‌انداز تفاضلی یا مبدل تک سر به تفاضلی استفاده کرد. اغلب مبدل‌های مدرن با عملکرد خوب از ورودی‌های تمام تفاضلی برای حذف نویز حالت مشترک، دو برابر کردن محدوده دینامیکی، بهبود خطینگی و ارتقای عملکرد کلی استفاده می‌کنند. اگرچه این مبدل‌ها می توانند ورودی تک سر را هم قبول کنند، اما وقتی بهترین عملکرد را خواهند داشت که سیگنال ورودی تفاضلی در اختیار داشته باشند. راه‌اندازهای داخلی مبدل، مدارهایی هستند که مخصوص همین امور طراحی شده‌اند و کارهای مهم دیگری از قبیل تغییر دامنه، تبدیل سیگنال تک سر به تفاضلی، بافر کردن، تنظیم آفست حالت مشترک و فیلتر کردن را انجام می‌دهند [۴]. جهت طراحی، شبیه‌سازی و تحقق تمامی مدارهای بخش آنالوگ از نرم‌افزار اچ اسپایس[19] استفاده شده است.

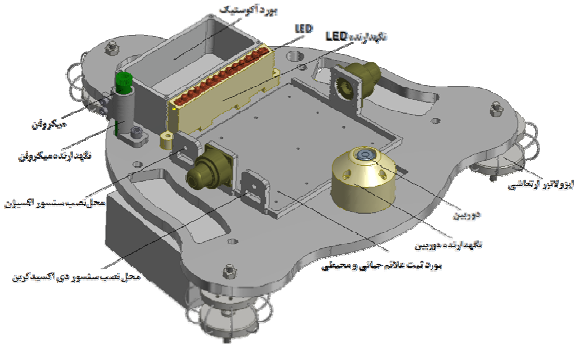
ساخت و تست زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی

کل زیرمجموعه ثبت داده آکوستیکی بر روی دو برد مدارچاپی پیاده‌سازی شده است. مدار چاپی اول که یک برد دولایه است در شکل (۵) نمایش داده شده است. تمامی بلوک‌های آنالوگ جهت به حداقل رساندن تداخل نویز دیجیتال بر روی این برد پیاده‌سازی شدند. بخش پردازنده دیجیتالی بر روی یک مدار چاپی چهار لایه پیاده‌سازی شده است. دو مدار چاپی بطور کامل روی هم‌دیگر قرار گرفته و عملاً یک مدار ۶ لایه را ایجاد می‌نمایند. تمامی ملاحظات تداخلات الکترومغناطیسی[20] و تطابق الکترومغناطیسی[21] جهت طراحی و ساخت این دو مدار چاپی مد نظر قرار گرفته شده است. شکل (۶) کل زیرمجموعهٔ ثبت داده‌های آکوستیکی را به همراه جعبه نهایی نمایش می‌دهد. در شکل (۷) نحوهٔ قرارگیری این زیرمجموعه بر روی بستر کپسول زیستی کاوشگر پژوهش نمایش داده شده است. جهت تست زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی از ساختار میز گسترده شکل (۸) استفاده شده است. انواع تست‌های کارایی و محیطی مختلف بر روی زیرمجموعه با در نظر گرفتن این ساختار انجام پذیرفت. جهت انجام تست‌های کارایی، از یک مولد امواج آکوستیکی مرجع با توانایی ایجاد سیگنال صوتی با فرکانس ۱ کیلوهرتز و دو دامنهٔ ۹۴ و ۱۱۴ دسی بل استفاده شد. در این آزمون کل سامانهٔ شکل ۸ به طور کامل راه‌اندازی شده و میکروفون در داخل محفظهٔ مولد صوت قرار گرفت. این آزمون در یک محیط کاملاً ساکت و ایزوله از لحاظ آکوستیکی انجام پذیرفت، تا اثر نویز محیط بر روی سیگنال اصلی مولد به صفر برسد. شکل (۹) شدت توان نویز اندازه‌گیری شده را نمایش می‌دهد. برای اندازه‌گیری نویز زیرسامانه می‌بایستی منبع سیگنال ورودی صفر شود. برای صفر شدن مولد ورودی می‌بایستی میکروفون را اتصال کوتاه کنیم. در این حالت فقط اثر اختشاشات و نویز خود سیستم در خروجی نمایش داده خواهد شد. بنابراین، میکروفون اتصال کوتاه شده و توان ثبت شده نمایش داده شده است [۱۳، ۱۴]. کاملاً واضح است که در سیگنال ثبت شده تمامی مقادیر انواع نویزها، تداخلات، اعوجاج و اغتشاشات مستتر است. دامنهٔ مؤثر نویز اندازه‌گیری شده ۷/۹ میکروولت است.

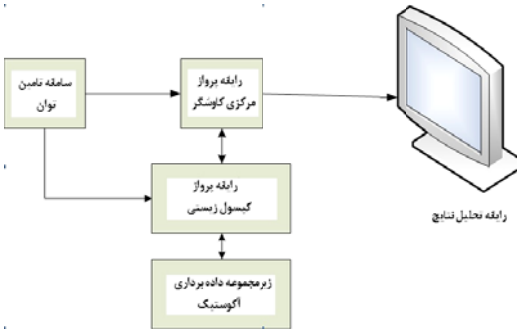
شکل ۵- بخش آنالوگ زیرمجموعه ثبت داده‌های آکوستیک

شکل ۶- کل زیرمجموعهٔ ثبت اطلاعات آکوستیک

18. Single Ended
19. HSPICE
20. Electro. magnetic Interference (EMI)
21. Electromagnetic Compatibility (EMC)



شکل ۷- نحوهٔ نصب زیرمجموعهٔ ثبت اطلاعات آکوستیکی در داخل کپسول زیستی کاوشگر پژوهش



شکل ۸- ساختار میز آزمون برای اندازه گیری عملکرد و کارایی زیرمجموعهٔ داده‌برداری آکوستیک

بنابراین برای گسترهٔ دینامیکی داریم [۶، ۱۴]:

$$Fn = 7.9 \times 10^{-6} \quad (۶)$$

$$Vm = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3.5714 \quad (۷)$$

$$DR = 20 \times \log\left(\frac{Vm}{Fn}\right) = 113dB. \quad (۸)$$

که در روابط فوق Fn مقدار موثر نویز حاشیه[۲۲]، Vm مقدار موثر حداکثر دامنه ولتاژ ورودی و DR مقدار گستره دینامیکی می‌باشد. شکل ۱۰ سیگنال بازسازی شده در رایانه تحلیل نتایج را نمایش می‌دهد. در این آزمون دستگاه مرجع مولد سیگنال آکوستیکی، میکروفون را به طور کامل در بر گرفته (محاط کرده است) و در حال تولید سیگنال آکوستیکی با دامنه ۹۴ دسی بل و فرکانس ۱ کیلوهرتز است. سیگنال پس از تبدیل به دیجیتال، ثبت و ذخیره‌سازی در حافظه افزونگی میکرو اس دی، توسط رایانه پرواز کاوشگر در اختیار رایانه تحلیل نتایج قرار گرفت. لازم به توضیح می‌باشد که مدت زمان آزمون ۲۰ دقیقه است که شکل ۱۵ فقط یک برش چند میلی ثانیه‌ای از این سیگنال را نمایش می‌دهد. محور افقی در این نمودار تعداد نمونه‌ها و نمودار عمودی شدت سیگنال بر حسب ولت می‌باشد. شکل ۱۱ تکرار آزمون فوق را به ازای شدت دامنه فشار آکوستیکی ۱۱۴ دسی بل نمایش می‌دهد. شکل ۱۲ تبدیل فوریه

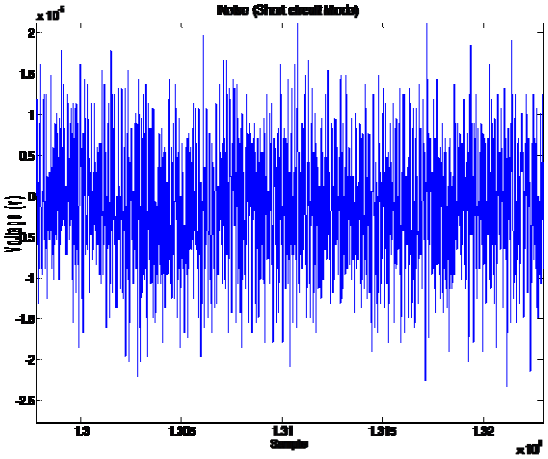
22. Floor Noise

سیگنال‌های زمانی اندازه‌گیری شده را نمایش می‌دهد. مقدار محدوده دینامیکی ظاهری (SFDR[۲۳]) حدود ۹۱ دسی بل اندازه گیری شد و با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام گرفته حداکثر فشار آکوستیکی قابل اندازه‌گیری ۱۴۰ دسی بل حاصل شد. برای مقدار حداکثر بیت مؤثر (ENOB[۲۴]) داریم [۶، ۱۴]:

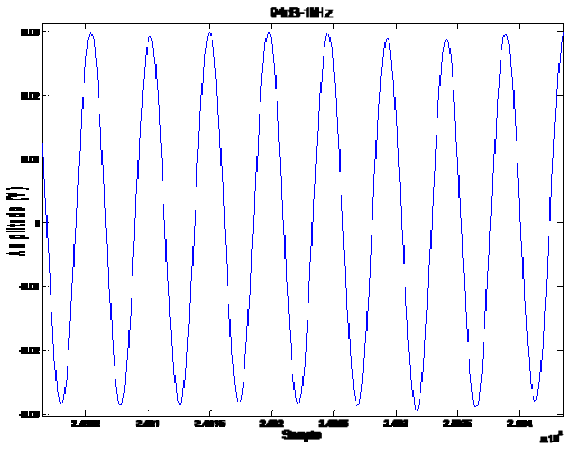
$$Sn = 20log\left(\frac{S}{D+N}\right) \quad (۹)$$

$$En = \frac{Sn - 1.76db + 20\log\left(\frac{Vm}{Vs}\right)}{6.02} \quad (۱۰)$$

که در آن، فوق S مقدار موثر توان سیگنال اندازه‌گیری شده، D مقدار مجموع اعوجاج هارمونیکی[۲۵]، N توان موثر نویز، Sn مقدار نسبت سیگنال به نویز و اعوجاج[۲۶]، Vs دامنه سیگنال ورودی (خروجی سنسور) و En تعداد بیت‌های موثر می‌باشد. با توجه به رابطه ۱۰ مقدار ENOB حدود ۱۸ بیت حاصل شد.

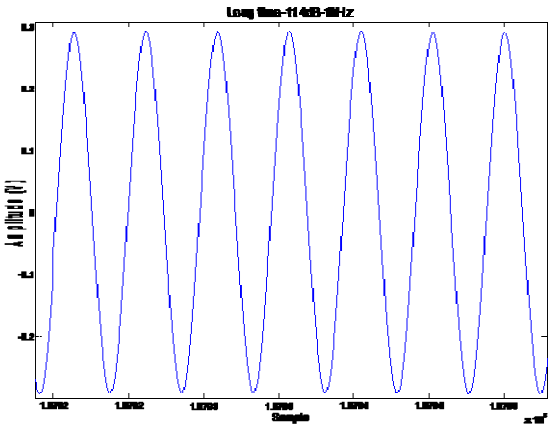


شکل ۹- توان نویز اندازه‌گیری شده

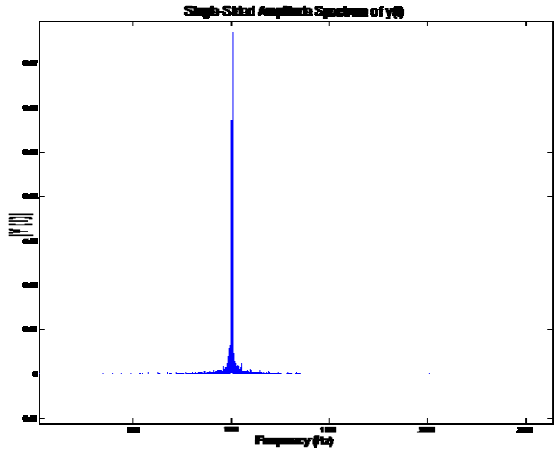


شکل ۱۰- سیگنال ثبت شده در فرکانس ۱ کیلوهرتز و شدت دامنه ۹۴ دسی بل

23. Spurious-Free Dynamic Range
24. Effective Number of Bits
25. Total Harmonic Distortion (THD)
26. Signal to Noise and Distortion (SINAD)



شکل ۱۱- سیگنال ثبت شده در فرکانس 1KHz و شدت 114dB



شکل ۱۲- تبدیل فوریه سیگنال با شدت۹۴ دسی بل در فرکانس ۱ کیلوهرتز

جهت انجام تست‌های محیطی دو مجموعهٔ تست تعریف و انجام گرفت. ابتدا آزمون ارتعاش، شوک مکانیکی و شتاب در سه جهت x، y و z توسط میز ارتعاش استاندارد بر روی زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی انجام شد. مجموعه در حین اجرای این آزمون‌ها در حالت عملکردی کامل بوده و علاوه بر سیگنال خروجی، میزان توان مصرفی و ارتباط با رایانه پرواز کپسول زیستی مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. در مجموعهٔ تست‌های دوم زیرمجموعه درون محفظه حرارتی خلأ قرار گرفته و مطابق شرح فوق آزمون تکرار شد. جدول ۳ خلاصه مشخصات کارآیی اندازه‌گیری شده را برای زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی پیشنهادی نمایش می‌دهد.

جدول ۳- خلاصه مشخصات کارآیی زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی

مشخصه	مقادیر اندازه‌گیری شده
سرعت نمونه‌برداری	حداکثر تا ۴۸ کیلوهرتز
گستره دینامیکی	حداکثر ۱۱۳ دسی بل (از ۲۷ تا ۱۴۰ دسی بل)
تعداد کانال‌های دریافت سیگنال	دو کانال مستقل
ولتاژ کاری	۲۸ ولت
حداکثر توان مصرفی	۲.۸ وات
دقت	۲۴ بیت
مقدار بیت موثر	۱۸ بیت
گستره دینامیکی ظاهری (SFDR)	۹۱ دسی بل
پهنای باند پوششی	۴ تا ۲۳ کیلوهرتز
ابعاد	۱۰۰ × ۴۶ ×۴۰ میلیمتر مکعب

نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی، ساخت و تست زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی کپسول زیستی کاوشگر پژوهش تشریح شد. طراحی بر پایه ماتریس الزامات سیستمی کاوشگر پژوهش انجام گرفت و در نهایت، تست‌های گروه تضمین محصول، تصدیق سند الزامات زیرمجموعه ثبت اطلاعات آکوستیکی کپسول زیستی را صحه‌گذاری کردند. تحقق دقت بسیار بالا، نویز بسیار پایین، تحمل شرایط سخت فضایی، ابعاد و جرم مناسب از ویژگی‌های زیرمجموعه داده‌برداری آکوستیک پیشنهادی بود. با توجه به گستره دینامیکی وسیع و کارآیی این زیرمجموعه، امکان استفاده از آن در مأموریت‌های دیگر فضایی به سهولت و اندکی تغییرات امکان‌پذیر است.

مراجع

[1] Available, [on Line] http://www.ari.ac.ir /index.php/fa/2016-04-03-12-42-44/2016-04-03-12-50-06.

[2] Hajebrahimi, Z., Alidoosti, L., Arabian, M., Alavi, E., Ebrahimi, M., and Bahramian, M., "The Study of Hypergravity and Flight Stress on Different Cell Lines Function in Sounding Rocket", *Journal of Space Sciences and Technologies*, Vol. 6, No. 4, 2014, pp. 73-79, (In Persian).

[3] Roller, C.A. and Clark, J.B.,"Short-duration Space Flight and Hearing Loss", *Otolaryngol Head Neck Surg.*, Vol. 129, No. 1, 2003, pp. 98-106.

[4] Ebrahimi, M. and *et. al., Research Probe System Requirements Matrix,* Research Probes System Reports, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran, 2013.

[5] Available, [Online]: https://www.bksv.com/

[6] Maloberti, Franco., *Data Converters*, Publisher: Springer US, ISBN: 978-0-387-32486-9, 2007.

[7] Available, [online]: https://www.analog.com/en/products/ad7760.html#product-overview

[8] Available, [online]: https://www.cirrus.com/products/ cs5381/

[9] Available, [online]: http://www.ti.com/product/PCM4222

[10] Jerad, L., *Technical Article MS-2275: Common Inter-IC Digital Interfaces for Audio Data Transfer,* Analog Devices, Inc. (January 2012).

[11] Arbona, J., *Application Report SLAA469 Audio Serial Interface Configurations for Audio Codecs*, Texas Instruments, September 2010.

[12] Khosh Baten, M., *Complete Reference of ARM Microcontrollers: NXP LPC17xx Edition*, Ghalam Azin Pub., Mashhad, Iran, 2012, (In Persian).

[13] NASA Technical Standard, "Payload Vibroacoustic Test Criteria, Measurement System Identification:" Nasa-Std-7001a, National Aeronautics and Space Administration Approved: 01-20-2011 Washington, DC, 20546-0001, 2011.

[14] Hill, G.M. and Evans, R.K., "Advanced Distributed Measurements and Data Processing at the Vibro-acoustic Test Facility, GRC Space Power Facility, Sandusky, Ohio-an Architecture and an Example", *25th Aerospace Testing Conference*, USAF/The Aerospace Corporation, El Segundo, California, United States, October 2009.

[15] Richard K. Evans and Gerald M. Hill, "Data Acquisition System Architecture and Capabilities at NASA GRC Plum Brook Station's Space Environment Test Facilities", *27th Space Simulation Conference, Annapolis, Maryland*, November 5–8, 2012.

[16] *NASA Systems Engineering Handbook*, Nasa/Sp-2016-6105 Rev2 Supersedes SP-2007-6105 Rev 1 dated December, 2007.