نشریه علمی «الکترومغناطیس کاربردی»
سال هفتم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۸؛ ص ۴۳- ۳۳

طراحی و ساخت سامانه پایش پارامترهای جوی به منظور پیش بینی وضع هوا

زهرا قطان کاشانی[1*]، سید امین ایزدی[2]، محمدجواد سیاهکاری[3]

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۲- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری،
۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۸/۰۳/۲۸، پذیرش: ۹۸/۰۹/۲۳)

چکیده

اندازه‌گیری مشخصات هوای بالای سطح زمین دارای کاربردهای تحقیقاتی و عملیاتی بسیار است. از موارد استفاده آن می‌توان پیش‌بینی وضع هوا را نام برد. سامانه رادیوسوند توسط بالون تا بالای لایه تروپوسفر یا بالاتر از آن حمل می‌شود و اطلاعات مختلفی مانند فشار، رطوبت، دما، مکان، سرعت و جهت وزش باد در ارتفاعات مختلف از سطح زمین را در حین صعود به‌دست آورده و با استفاده از یک فرستنده رادیویی به ایستگاه زمینی مخابره می‌کند. در این مقاله، طراحی سیستمی و مراحل ساخت و تست یک نمونه رادیوسوند در فرکانس ۴۰۰/۶ MHz به همراه گیرنده زمینی و آنتن مربوطه به تفصیل توضیح داده شده است. هدف از این طرح، ساخت سامانه رادیوسوند بومی به‌منظور رفع نیاز سازمان هواشناسی می‌باشد. اگرچه قیمت این سامانه در مقایسه با نمونه خارجی آن بسیار کم است ولی دارای عملکرد و پایداری عالی تحت تغییرات دمایی شدید است. نتایج تست‌های انجام شده با نمونه‌های خارجی مشابه همخوانی خوبی دارد.

کلیدواژه‌ها: رادیوسوند، پیش‌بینی وضع هوا، حسگر دما و رطوبت، حسگر فشار، GPS

۱. مقدمه

جمع‌آوری اطلاعات جوی از ارتفاع‌های مختلف اتمسفر با استفاده از حسگرهایی که توسط هواپیما یا بالون حمل می‌شوند امکان‌پذیر است. حسگرهایی که توسط بالون حمل می‌شوند، حسگرهایی هستند که به‌طور عادی و دائمی در دنیا به‌کار می‌روند و در هزاران ایستگاه هواشناسی در آسمان رها شده تا داده‌های اولیه مورد نیاز پیش‌بینی وضع هوا را تهیه کنند [۱]. علاوه‌بر این، برای کاربردهای خیلی خاص مانند اندازه‌گیری مقدار ازون موجود در استراتوسفر نیز می توان از آنها استفاده نمود. در برخی وضعیت‌های اضطراری مانند انتشار مواد رادیواکتیو یا فوران های آتش‌فشانی نیز، بالون‌ها حسگرهایی را حمل می‌کنند که عمل نمونه‌برداری را به‌طور مطمئن و ایمن در سراسر لایه تروپوسفر انجام می‌دهند. علاوه بر موارد مذکور، از داده های رادیوسوند می‌توان برای ارزیابی بار تهویه‌کننده‌های هوا در ساختمان‌های بلند با ارتفاع m ۲۰۰-۵۰ استفاده نمود [۲].

سامانه‌ای که با استفاده از امواج رادیویی، داده‌های حاصل از اندازه‌گیری حسگرها را به ایستگاه زمینی ارسال می‌کند رادیوسوند (Radiosonde) نامیده می‌شود. اولین نمونه‌های رادیوسوند هواشناسی به‌صورت مکانیکی عمل می‌کردند [۳]. با گذشت زمان و توسعه صنعت الکترونیک به‌خصوص صنعت نیمه‌هادی به تدریج بخش‌های مکانیکی حذف و جای خود را به مدارهای مجتمع دادند. در نهایت با ظهور و توسعه تراشه‌های پردازش دیجیتال به شکل کنونی خود درآمدند. به‌عنوان مثال، در سال ۱۹۸۰ تولید رادیوسوند الکترونیکی آنالوگ RS80 و در سال های اخیر رادیوسوند دیجیتالی RS92 محقق شد [۴].

در عصر حاضر چند شرکت معتبر در زمینه تولید رادیوسوند فعالیت دارند که عبارتند از: شرکت فنلاندی Vaisala، شرکت فرانسوی Meteomodem، شرکت آلمانی Graw، شرکت ژاپنی Meisei و شرکت آمریکایی Sippican.

از جمله نکات مهمی که در طراحی رادیوسوند در نظر گرفت به‌صورت زیر می‌باشد [۵]:

۱. وزن: واضح است که وزن رادیوسوند باید تا آنجا که ممکن است بسیار کم باشد به‌ویژه این‌که تنها نقش فرستنده و انتقال اطلاعات حسگرها به گیرنده زمینی را دارد.
۲. توان مصرفی: باید از قطعاتی استفاده نمود که توان مصرفی آنها تا حد ممکن پایین باشد.
۳. قابلیت عملکرد قطعات در دمای پایین.
۴. قابلیت عملکرد قطعات در فشار پایین.

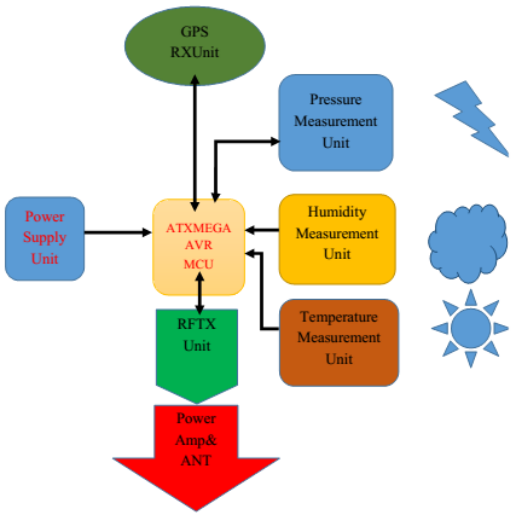
در این مقاله، در بخش ۲، طراحی سیستمی یک نمونه سامانه رادیو سوند هواشناسی به تفصیل توضیح داده شده است. در

* نویسنده پاسخگو: z.ghattan@kntu.ac.ir

بخش ۳، توضیحات گیرنده ایستگاه زمینی به همراه آنتن آن و نتایج شبیه‌سازی و ساخت آورده شده است. در بخش ۴، محاسبه بودجه توان مسیر مخابرتی فرستنده-گیرنده رادیوسوند و در بخش ۵، نرم‌افزار مورد استفاده ارائه شده است. در بخش ۶، فرآیند آماده‌سازی سامانه رادیوسوند نشان داده شده است. بخش ۷، نتایج عملکرد عملی سامانه رادیوسوند را در بردارد.

۲. طراحی سیستمی رادیوسوند

در این بخش، طراحی سیستمی مطلوب ارائه می‌شود که شامل بخش‌های مختلف تشکیل‌دهنده رادیوسوند است. چیدمان مفهومی رادیوسوند در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): چیدمان مفهومی رادیوسوند.

اجزاء اصلی سامانه عبارتند از:

- واحد گیرنده GPS و آنتن مربوطه
- واحد اندازه‌گیری فشار هوا
- واحد اندازه‌گیری رطوبت و دما
- واحد کنترل و پردازش
- واحد مدولاسیون و فرستنده
- واحد تقویت‌کننده توان و خط انتقال سیگنال RF و آنتن
- بودجه توان
- واحد باطری و منبع تغذیه
- لوازم جانبی شامل:جعبه یا بدنه، بالن و چتر
- گیرنده و آنتن گیرنده

همچنین اجزاء فرستنده و گیرنده و طراحی آن‌ها باید به نحوی باشد که شرایط ذکر شده در ذیل را دارا باشد:

- بازه عملکرد دمایی $-40^{\circ}C$ - $+70^{\circ}C$
- بازه عملکرد رطوبت ۰ – ۱۰۰ %
- ولتاژ کاری ۶+ V
- عملکرد تا ارتفاع ۴۰ Km
- پایداری ارتباطی تا فاصله ۷۰ Km

در ادامه به شرح ویژگی و عملکرد اجزاء مختلف پرداخته می‌شود.

۲-۱. واحد گیرنده GPS و آنتن مربوطه

استفاده از GPS، یک روش رایج در محاسبه موقعیت [۶] و سرعت وزش باد است. با توجه به الزامات مورد نیاز ساخت سامانه رادیوسوند و بررسی‌های انجام شده، گیرنده GPS با نام Copernicus II ساخت شرکت Trimble انتخاب شد.

این گیرنده دارای ویژگی‌های عمومی اندازه کوچک، توان مصرفی کم، حساسیت بالا و سرعت مناسب بوده و برای کاربردهای پرتابل که منبع توان آن باطری است بسیار مناسب است. این گیرنده GPS در باند فرکانسی L1 (۱۵۷۵/۴۲ MHz)کار می‌کند و استانداردهای ارتباطی TSIP[1] و NMEA[2] را توسط دو درگاه سریال مجزاء فراهم می‌کند. البته پروتکل ارتباطی TAIP را نیز پشتیبانی می‌کند. در این ماژول، مدارهای مربوط به RTC و TCXO گنجانده شده و با استفاده از آنها، این ماژول می‌تواند خروجی زمان‌بندی PPS[3] را نیز تولید کند. گیرنده Copernicus II دارای یک تقویت‌کننده کم نویز (LNA) است که با به‌کارگرفتن هر دو نوع آنتن فعال و غیرفعال سازگار است و شامل پین‌های (I/O) برای تشخیص آنتن فعال و شرایط اتصال کوتاه و مدار باز برای آنتن است. مشخصات فنی گیرنده GPS در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات فنی گیرنده.

PARAMETER	VALUE(S)
Update Rate	1 Hz
Number of Channels	12
Accuracy	
Position (autonomous)	<2.5 m 50%, <5 m 90%
Position (SBAS)	<2 m 50%, <4 m 90%
Altitude (autonomous)	<5 m 50%, <8 m 90%
Altitude (SBAS)	<3 m 50%, <5 m 90%
Static PPS	±60 ns RMS
Velocity	0.06 m/s
PPS, Stationary Mode "Indoor"	±350 ns @ -145 dBm
Acquistion time	
Re-Acquisition	2 s 50%
Hot Start	3 s 50%
Hot Start - No battery backup[1]	8 s 50%
Warm Start	35 s 50%
Cold Start	38 s 50%
Sensitivity	
Tracking	–160 dBm
Acquistion[2]	–148 dBm
Dynamics	
Acceleration	2 g
Max Operational Velocity	515 m/s

[1]- Trimble Standard Interface Protocol
[2] -National Marine Electronics Association
[3]- Pulse Per Second

به‌طور کلی دو نوع آنتن GPS پر کاربرد وجود دارد که عبارتند از Patch و Geohelix. آنتن Patch مربوط به GPS رادیوسوند در شکل (۲)، نشان داده شده است.

شکل (۲): آنتن **Patch** مربوط به **GPS** رادیوسوند

۲-۲. واحد اندازه‌گیری فشار هوا

با توجه به الزامات مورد نیاز ساخت سامانه رادیوسوند و بررسی‌های انجام شده، حسگر فشار دیجیتالی با نام Variometer (شکل (۳)) انتخاب شد.

شکل (۳): نمای ظاهری قطعه اندازه‌گیری فشار هوا.

در جدول (۲) مشخصات فنی مربوط به قطعه حسگر فشار آورده شده است.

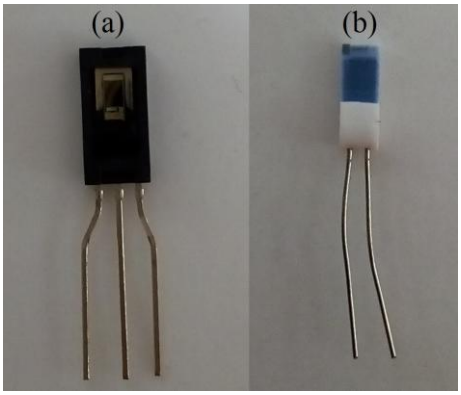
جدول (۲): مشخصات فنی ماژول حسگر **فشار**

Sensor Performances (V_{DD} = 3 V)				
Pressure	**Min**	**Typ**	**Max**	**Unit**
Range	10		1300	mbar
ADC	24			bit
Resolution (1)	0.065 / 0.042 / 0.027 / 0.018 / 0.012			mbar
Accuracy 25°C, 750 to 1100 mbar	-1.5		+1.5	mbar
Accuracy -20°C to + 85°C, 300 to 1100 mbar (2)	-2.5		+2.5	mbar
Response time	0.5 / 1.1 / 2.1 / 4.1 / 8.22			ms
Long term stability		-1		mbar/yr
Temperature	**Min**	**Typ**	**Max**	**Unit**
Range	-40		+85	°C
Resolution		<0.01		°C
Accuracy	-0.8		+0.8	°C

Notes: (1) Oversampling Ratio: 256 / 512 / 1024 / 2048 / 4096
(2) With autozero at one pressure point

۲-۳. واحد اندازه‌گیری رطوبت و دما

معمولا در سامانه رادیوسوند برای اندازه‌گیری دما و رطوبت هوا از حسگرهای الکتریکی استفاده می‌شود (شکل (۴)). این نوع حسگرها برای قراردادن در یک سطح کوچک بدون پوشش بهینه شده‌اند تا خطاهای اندازه‌گیری ناشی از تشعشعات و اغتشاشات رادیویی (نویز رادیویی) موجود در جو زمین را حداقل کند.



شکل (۴): نمای ظاهری ماژول حسگر رطوبت **(a)** و دمای هوا **(b)**.

ویژگی‌های عمومی حسگر دما و رطوبت هوا در جدول‌های (۴-۳) آورده شده است.

جدول (۳): ویژگی‌های عمومی حسگر رطوبت HIH-4000-003.

Relative humidity	from 0 to 100 %RH
Ambient temperature (AT)	from –40°C to 85°C
Voltage output	VOUT=(VSUPPLY)(0.0062(sensor RH) + 0.16)
RH response time	0.07 S

جدول (۴): مشخصات پاسخ دمایی حسگر دما **PT-100**.

°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω
-200	18,52	0	100,00	200	175,86	400	247,09	600	313,71	800	375,70
-190	22,83	10	103,90	210	179,53	410	250,53	610	316,92	810	378,68
-180	27,10	20	107,79	220	183,19	420	253,96	620	320,12	820	381,65
-170	31,34	30	111,67	230	186,84	430	257,38	630	323,30	830	384,60
-160	35,54	40	115,54	240	190,47	440	260,78	640	326,48	840	387,55
-150	39,72	50	119,40	250	194,10	450	264,18	650	329,64	850	390,48
-140	43,88	60	123,24	260	197,71	460	267,56	660	332,79		
-130	48,00	70	127,08	270	201,31	470	270,93	670	335,93		
-120	52,11	80	130,90	280	204,90	480	274,29	680	339,06		
-110	56,19	90	134,71	290	208,48	490	277,64	690	342,18		
-100	60,26	100	138,51	300	212,05	500	280,98	700	345,28		
- 90	64,30	110	142,29	310	215,61	510	284,30	710	348,38		
- 80	68,33	120	146,07	320	219,15	520	287,62	720	351,46		
- 70	72,33	130	149,83	330	222,68	530	290,92	730	354,53		
- 60	76,33	140	153,58	340	226,21	540	294,21	740	357,59		
- 50	80,31	150	157,33	350	229,72	550	297,49	750	360,64		
- 40	84,27	160	161,05	360	233,21	560	300,75	760	363,67		
- 30	88,22	170	164,77	370	236,70	570	304,01	770	366,70		
- 20	92,16	180	168,48	380	240,18	580	307,25	780	369,71		
- 10	96,09	190	172,17	390	243,64	590	310,49	790	372,71		

۲-۴. واحد کنترل و پردازش

با توجه به الزامات مورد نیاز طراحی و ساخت سامانه رادیوسوند و بررسی‌های انجام‌شده، میکروکنترلر سری ATmega-AVR-128A برای این طرح انتخاب شد. این میکرو وظیفه دریافت اطلاعات و پردازش آن‌ها را بر عهده دارد، این امر بدین صورت است که ابتدا

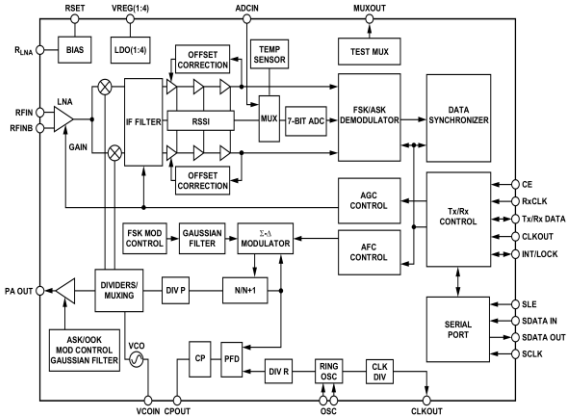
میکرو با استفاده از استانداردهای ارتباطی در نظر گرفته‌شده، برای هرکدام از حسگرها، اطلاعات را دریافت می‌کند و سپس با استفاده از قرار دادن شناسه‌ای برای هرکدام آن‌ها و اضافه کردن preamble به هر کدام از آن‌ها، اقدام به ارسال اطلاعات به قطعه فرستنده می کند، که در قسمت ذکر شده، با اضافه کردن preamble به داده مد نظر، خطای دریافت کاهش پیدا می کند.

۲-۵. واحد مدولاسیون و فرستنده

وظیفه این بخش دریافت داده سریال، انجام مدولاسیون مناسب و تولید سیگنال RF است. با توجه به الزامات مورد نیاز ساخت سامانه رادیوسوند و بررسی‌های انجام شده، در نهایت قطعه فرستنده با نام ADF7020 انتخاب شد. این گیرنده دارای ویژگی‌های عمومی زیر است:

- قابلیت مدولاسیون‌های FSK/GFSK/OOK/GOOK/ASK.
- محدوده فرکانس عملکرد ۷۵ MHz تا ۱ GHz.
- قابلیت برنامه‌ریزی توان، فرکانس و نوع مدولاسیون خروجی با استفاده از رجیسترهای ۳۲ بیتی.
- رابط ۳ سیمه برای ارتباط با هر نوع پردازنده به‌منظور کنترل و برنامه‌ریزی رجیسترها.
- نرخ تبادل داده DC تا ۱۷۹/۲ kbps.

در شکل (۵) شمای داخلی قطعه فرستنده نشان داده شده است.



شکل (۵): شمای کلی فرستنده ADF7020.

فرستنده رادیویی مسیر ارتباطی اطلاعات را به ایستگاه زمینی دور دست برقرار می‌کند. فرستنده یک وسیله تک کاناله می‌باشد که در فرکانسی در حدود ۴۰۰MHz در اروپا کار می‌کند اما طول موج‌های کوتاه‌تر نیز در سامانه‌های دیگر که به وسیله قوانین و مقررات بین‌المللی رادیویی مشخص شده است، استفاده می‌شوند. اطلاعات اندازه‌گیری شده با استفاده از روش‌های مدولاسیون به این سیگنال رادیویی اضافه می‌شوند. در ساده‌ترین حالت آن با سوئیچ کردن موج حامل یا روشن و خاموش کردن آن که به‌عنوان مدولاسیون موج حامل شناخته می‌شود، این عمل انجام می‌گردد. این امر می‌تواند با تغییر دامنه سیگنال ارسالی (مدولاسیون دامنه) یا تغییر فرکانس موج حامل (مدولاسیون فرکانس) انجام شود.

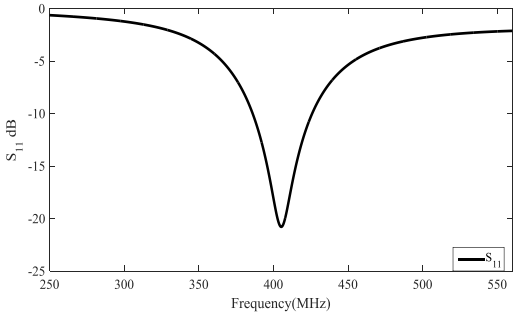
در این طراحی از مدولاسیون FSK به دلیل زیر استفاده می‌کنیم:

- احتمال خطای کمتری دارد
- نرخ انتقال داده بالا (Bit Rate) بالا
- نسبت به ASK از مصونیت بالاتری نسبت به نویز پذیری برخوردار بوده و بنابراین، احتمال دریافت سیگنال عاری از هرگونه خطا در این حالت بیشتر است.
- SNR بالا در گیرنده
- مناسب برای استفاده در ارتباطات از راه دور
- توان مورد نیاز در این حالت ثابت است.
- حساسیت بسیار بالای گیرنده

با تنظیم کردن ADF7020 توان خروجی، مدولاسیون و انحراف فرکانس را مطابق با آن چه مد نظر می باشد، می توان تعیین کرد. در این طراحی توان خروجی ADF7020 به‌صورت ۱۳ dBm تنظیم شده است که بعد از تقویت توان آن به ۲۱ dBm افزایش پیدا کرده و بر روی آنتن فرستنده قرار می گیرد.

انحراف فرکانسی نیز به علت سهولت در دمدولاسیون و افزایش دقت گیرنده، به صورت ۵± KHz تنظیم شده است. همچنین طبق دیتاشیت ADF7020 با تنظیم انحراف فرکانسی به‌صورت ۵± KHz و نرخ ارسال اطلاعات به‌صورت ۱ Kbit/S، BER به اندازه ۰/۰۰۱ می‌شود.

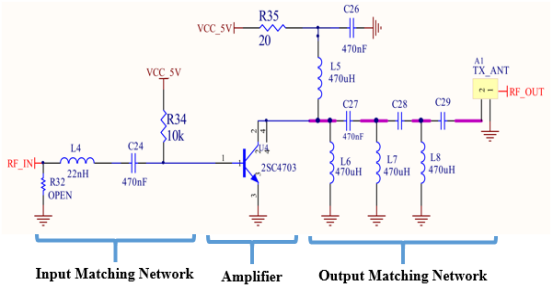
برای آنتن فرستنده از آنتن Monopole استفاده‌شده است. این نوع آنتن ازنظر مکانیکی بسیار ساده است و تقریباً در تمام جهات افقی به‌طور یکسان تشعشع کرده و هیچ‌گونه تشعشعی در راستای عمودی ندارد. طول این آنتن ۱۸/۷۵ cm است که برابر با فرکانس موردنظر (۴۰۰ MHz) می‌باشد. نمودار S_{11} این آنتن در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل (۶): نمودار شبیه‌سازی S_{11} آنتن Monopole در نرم‌افزار CST.

۲-۶. تقویت‌کننده خروجی

در خروجی رادیوسوند به‌منظور تقویت سیگنال نهایی یک مدار تقویت‌کننده خروجی در نظر گرفته‌شده است. در این مدار از قطعه 2SC4703 استفاده شده است. در شکل (۷) نقشه مدار تقویت‌کننده خروجی نمایش داده شده است.



شکل (۷): نقشه مدار تقویت‌کننده خروجی.

۲-۷. باتری

در رادیوسوندهای اولیه از مدل‌های کم وزن باتری تَر (مرطوب) سرب- اسید استفاده می‌شد، اما امروزه از باتری‌هایی مانند Alkaline یا حتی Lithium استفاده می‌شود. شکل (۸) باطری از نوع Lithium استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

شکل (۸): سه باتری با ولتاژ 3V از نوع Lithium.

از مهمترین ویژگی این باتری‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

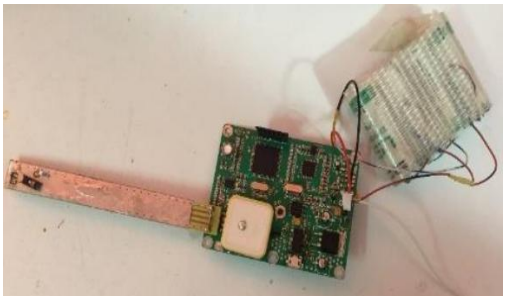
۱. ولتاژ عملکردی ۳ V پایدار
۲. رنج دمایی عملکردی بین ۴۰ °C- تا ۸۵ °C+
۳. حفظ ۹۵٪ ظرفیت اولیه حتی بعد از گذشت ۱۰ سال
۴. عدم استفاده از مواد سمی در ساختار آن

در این باطری‌ها هیچ‌گونه خطر پاشیدن اسید وجود ندارد و می تواند در هر کجا که مناسب بود قرار داده شوند. ضمنا این امکان وجود دارد که باطری‌ها همواره به‌وسیله یک سوئیچ متصل به سامانه رادیو سوند باشند و سوئیچ را در هنگام پرواز واقعی و یا برای تست فعال نمود.

۲-۸. لوازم جانبی شامل: جعبه یا بدنه، بالن و چتر

برای ساخت بدنه لازم است که از ماده‌ای با خواص: وزن کم، عایق رطوبت و عایق دما استفاده شود. بدین منظور در این طرح از ماده یونولیت (Styrofoam یا Expanded Polystyrene) استفاده می‌شود. نمای بیرونی و داخلی بدنه یونولیتی یک نمونه رادیوسوند به ترتیب در شکل‌های (۱۰-۹) نشان داده شده است.

شکل (۹): نمای بیرونی بدنه یونولیتی یک نمونه رادیوسوند.



شکل (۱۰): نمای داخلی یک نمونه رادیوسوند.

در هنگام صعود و افزایش ارتفاع، بالون به‌طور پیوسته منبسط شده و در نهایت می‌ترکد و جعبه رادیوسوند با استفاده از چتر به‌طور آرام فرود می‌آید. بالن مناسب برای انجام این طرح از جنس Latex است. وقتی این بالن با مقدار معین و استانداردی از گاز هیدروژن پر شود توانایی حمل بار تا ارتفاع زیادی را دارد. با بالا رفتن بالن فشار هوا کاهش می‌یابد و حجم بالن افزایش می‌یابد و قطر آن تا ۳ m زیاد می‌شود. بیشترین ارتفاع ثبت شده برای بالن حدود ۴۰۰۰۰ ft می‌باشد.

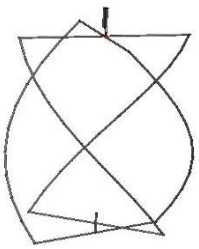
۳. گیرنده زمینی و آنتن گیرنده

طراحی و ساخت گیرنده به‌منظور دریافت سیگنال‌های ارسالی توسط فرستنده رادیوسوند صورت می‌گیرد. این قسمت شامل یک مدار پردازنده و گیرنده به‌منظور دریافت و پردازش سیگنال‌ها می‌باشد. در این قسمت نیز مانند فرستنده از میکروکنترلر سری ATxmega-AVR برای پردازش و از ADF7020 برای دریافت

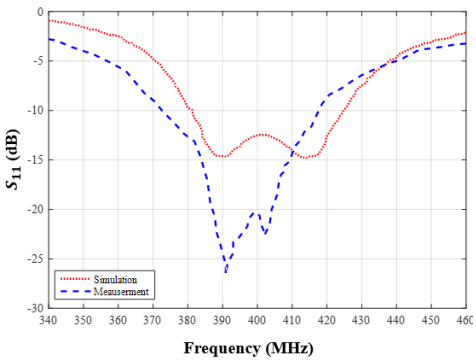
اطلاعات استفاده می‌شود. در گیرنده به‌منظور دمدوله کردن سیگنال دریافتی، پردازنده گیرنده ماژول ADF7020 را به‌صورت گیرنده و دمدولاتور FSK تنظیم می‌کند، سپس Preamble را از دیتای دریافتی ADF7020 حذف و با استفاده از شناسه‌ای که برای هر دریتا در نظر گرفته است، مقدار هر متغییر را مشخص کرده و سپس آن متغییر را برای کامپیوتر ارسال کرده و بر روی نمایشگر نیز نشان می‌دهد.

به‌منظور عملکرد بهتر برای گیرنده در فواصل دورتر، قبل از دریافت اطلاعات توسط ADF7020 در گیرنده، یک طبقه LNA قرار داده شده است، که با توجه به آن که برای گیرنده دو کانال طراحی شده است، برای یک کانال تقویت‌کننده ۲۰ dB و برای دیگر ۴۰ dB لحاظ شده است، که استفاده از هر کدام با توجه به نیاز کاربر نسبت به دریافت اطلاعات در فواصل دورتر یا نزدیکتر، مشخص می‌گردد.

برای گیرندگی بهینه، طراحی آنتن نیز حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به گستره مکانی فرستنده در فضا، طراحی آنتن با الگو همه جهته مطلوب می‌باشد. در این سامانه، آنتن Quadrature helix برای گیرنده پیشنهاد می‌شود، که با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در [۷] و [۸] و روابط ارائه‌شده اقدام به طراحی آنتن در نرم‌افزار CST می‌نماییم. در شکل (۱۱) شبیه‌سازی آنتن در نرم‌افزار CST و در شکل (۱۲) نمودارهای شبیه‌سازی اندازه‌گیری S_{11} آنتن و در شکل (۱۳) الگوی شبیه‌سازی آنتن نشان داده شده است. همچنین قطبش این آنتن دایروی می‌باشد که در شکل (۱۴) نمودار AR آن قرار داده شده است.

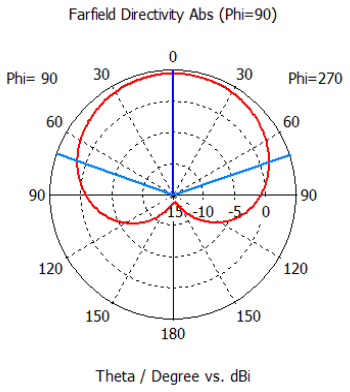


شکل (۱۱): آنتن Quadrature helix شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار CST.

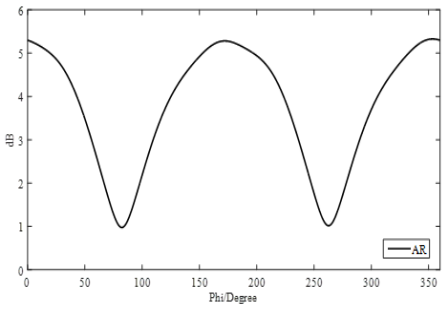


شکل (۱۲): نمودار شبیه‌سازی و اندازگیری S_{11} آنتن در نرم‌افزار CST.

در این شکل خط قرمز نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی و خط آبی نشان‌دهنده نتایج اندازه‌گیری می‌باشند.

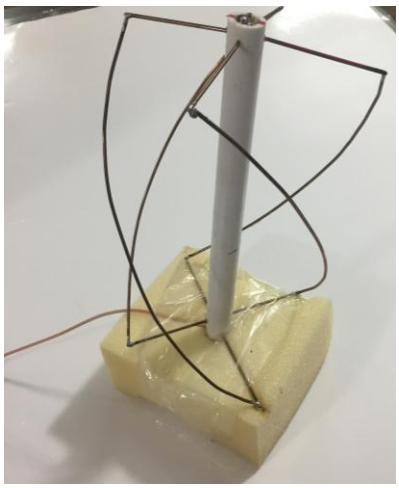


شکل (۱۳): الگو شبیه‌سازی آنتن Quadrature helix در نرم‌افزار CST.



شکل (۱۴): نمودارAR شبیه‌سازی آنتن Quadrature helix در نرم‌افزار CST.

شکل (۱۵) نمونه ساخته‌شده آنتن Quadrature helix و مشخصات مهم آن را نشان می‌دهد. آنتن مدنظر به کمک مفتول‌های فلزی با روکش مسی ساخته شده است. اگر استوانه‌ای را حول آنتن متصور شویم، قطر آن ۱۲ cm و ارتفاع آن۱۵ cm است.



شکل (۱۵): آنتن Quadrature helix ساخته‌شده.

در جدول (۵) مشخصات عملکردی آنتن و همچنین ابعاد آن آمده است.

جدول (۵): مشخصات عملکردی و هندسی آنتن Quadrature helix.

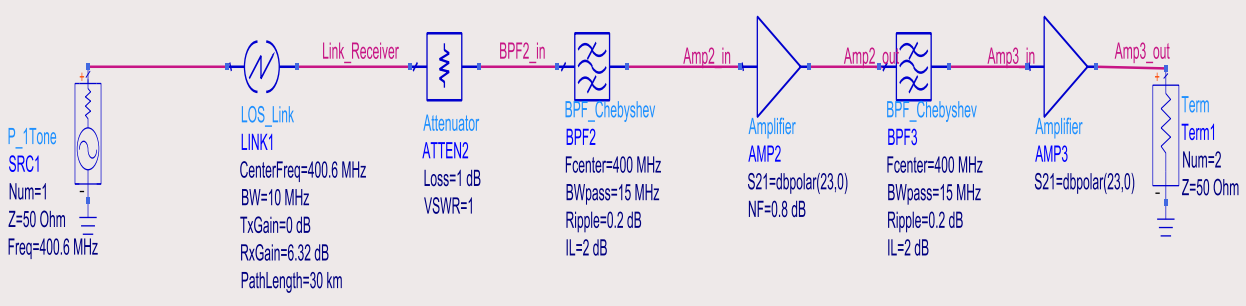
فرکانس	370 – 420 MHz
بهره	6.32 dB
ابعاد	12 * 15 Cm

همان‌طور که از مقایسه نمودار S_{11} اندازه‌گیری و شبیه‌سازی مشخص است، آنتن ساخته‌شده در بازه مورد نظر دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. گیرنده طراحی‌شده برای رادیو سوند ساخته شده، دارای دو کانال مجزا می‌باشد؛ که هرکدام به‌صورت جداگانه می‌توانند در بازه فرکانس ۴۰۶ MHz -۴۰۰ در کانال‌هایی به فاصله ۵۰ KHz اطلاعات را دریافت نمایند. تنظیم کانال مورد نظر به‌صورت نرم‌افزاری صورت می‌پذیرد. همچنین برای یکی از کانال‌های گیرنده، نمایشگری در نظر گرفته شده که امکان رصد کردن اطلاعات دریافتی از رادیو سوند را مهیا می‌نماید.

لازم به‌ذکر است در طراحی PCB، خطوط RF به نحوی قرار داده می‌شوند که کمترین اثرات نویز را بر عملکرد مدار گذاشته و هم‌چنین به‌واسطه خطوط دیجیتال موجود نویزپذیری کمی داشته باشد. همچنین LNA طراحی‌شده را داخل جعبه فلزی قراردادِ می‌شود تا باعث ایجاد نوسان نشود.

برای نمایش اطلاعات بر روی کامپیوتر و پردازش آن‌ها هرکدام از کانال های گیرنده به طور جداگانه امکان ارسال اطلاعات برای نرم‌افزار را در هر دو ثانیه دارند. نرم‌افزار طراحی شده با توجه به اطلاعات دریافتی، فایل TEMP را تشکیل می‌دهد.

در شکل (۱۶) مسیر مخابراتی شبیه‌سازی شده گیرنده زمینی که شامل آنتن گیرنده، فیلترها و تقویت کننده‌ها می‌باشد، نشان داده شده است. در شبیه‌سازی گیرنده، فرکانس مرکزی ۴۰۰/۶ MHz در نظر گرفته شده است.



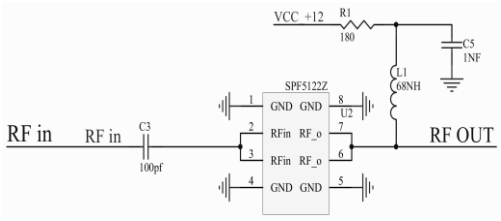
شکل (۱۶): مسیر مخابراتی شبیه‌سازی گیرنده زمینی.

در جدول (۶) مشخصات گیرنده طراحی‌شده ارائه شده است.

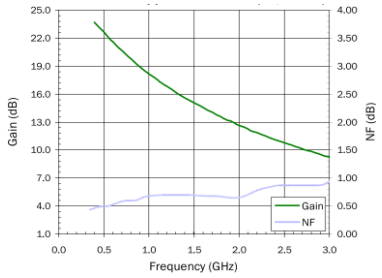
جدول (۶): مشخصات گیرنده رادیوسوند طراحی شده.

پارامتر	A کانال	B کانال
بازه فرکانس	۴۰۰ – ۴۰۶ MHz	۴۰۰ – ۴۰۶ MHz
فاصله فرکانسی بین کانال‌ها	۵۰ KHz	۵۰ KHz
تغذیه	۲۲۰ V AC	۲۲۰ V AC
ارتباط	USB.2	USB.2
نمایشگر	گرافیکیLCD	ندارد
امپدانس آنتن	۵۰ Ω	۵۰ Ω
بهره تقویت کننده داخلی	۴۰ dB	۲۰ dB

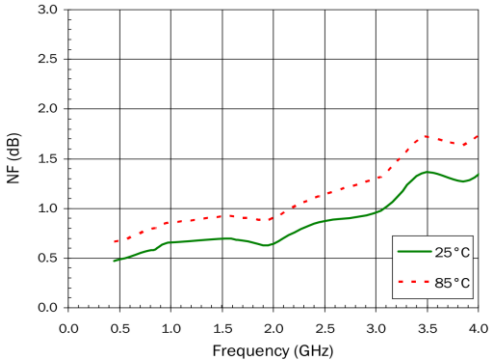
همچنین در خروجی گیرنده از یک LNA با مشخصات SPF5122Z استفاده شده است. این تقویت‌کننده در فرکانس ۴۰۰ MHz دارای بهره خروجی ۲۰ dB می‌باشد و همچنین عدد نویز آن در فرکانس مورد نظر ۰/۶ dB می‌باشد. لازم به‌ذکر است برای کارکرد مطلوب در فواصل دور، دوطبقه تقویت‌کننده لحاظ شده است. لذا بهره نهایی ۴۰ dB برای کانال‌های گیرنده لحاظ شده است. در شکل‌های (۱۹-۱۷) به ترتیب نقشه مدار، نمودار بهره گیرنده و عدد نویز و نمودار عدد نویز در دو دمای مختلف این تقویت‌کننده قرار داده شده است.



شکل (۱۷): نمودار مدار تقویت کننده LNA گیرنده.

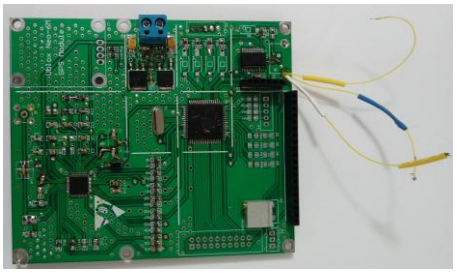


شکل (۱۸): نمودار بهره خروجی و عدد نویز برحسب فرکانس LNA گیرنده.



شکل (۱۹): نمودار عدد نویز برحسب فرکانس **LNA** گیرنده در دو دما.

همچنین شکل (۲۰) نمای داخلی گیرنده زمینی ساخته‌شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲۰): نمای داخلی گیرنده زمینی

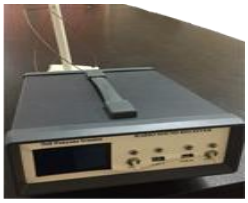
در شکل (۲۱) نمای جلوی گیرنده که به‌همراه کلیدهای روشن/خاموش و همچنین اتصالات USB در نظر گرفته شده همراه با نمایشگر مربوط به کانال A نشان داده شده است.

شکل (۲۱): نمای جلو گیرنده زمینی رادیوسوند.

در شکل (۲۲) نمای پشت گیرنده رادیو سوند که شامل کانکتور تغذیه و کانکتور N-Type برای آنتن‌های ورودی است، آورده شده است.

شکل (۲۲): نمای پشت گیرنده زمینی رادیو سوند.

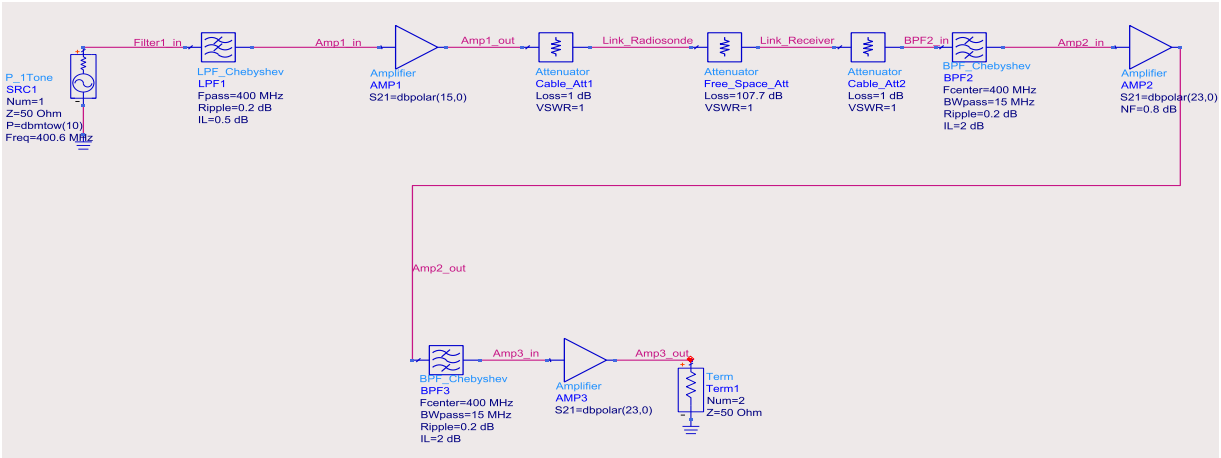
در شکل (۲۳) گیرنده زمینی رادیوسوند به همراه آنتن آن آورده شده است



شکل (۲۳): گیرنده زمینی رادیوسوند به همراه آنتن.

۴. محاسبه بودجه توان مسیر مخابراتی فرستنده- گیرنده رادیوسوند

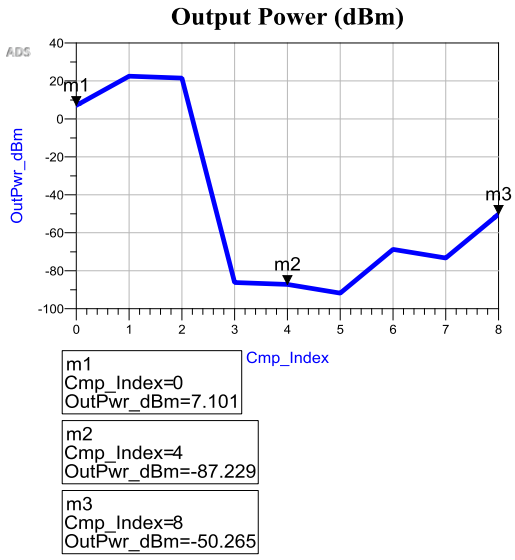
گیرنده رادیوسوند در عمل به‌صورت line of sight باید تا فاصله ۷۰ Km سیگنال ارسالی توسط فرستنده را دریافت کند، با توجه به آن که تلف مسیر در فرکانس ۴۰۰/۶ MHz برابر با ۱۲۱/۴ dB است، و همچنین حساسیت گیرنده ADF7020 برابر با ۱۱۷/۵ dBm- است، به‌منظور دریافت صحیح سیگنال، مانند آنچه که در شکل (۲۴) نشان داده شده است، مسیر ارتباطی طراحی می‌شود.



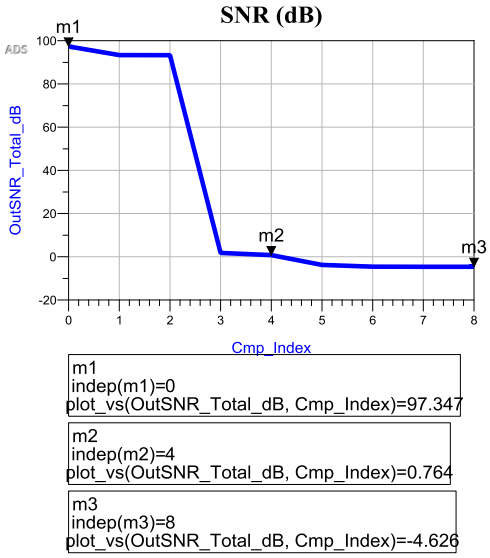
شکل (۲۴): بودجه توان مسیر ارتباطی رادیوسوند و گیرنده زمینی.

در واقع با قرار دادن تقویت‌کننده‌ها و فیلترهایی در فرستنده رادیوسوند و گیرنده زمینی و با نظر گرفتن تلف‌های مسیر شامل تلفات فیلترها، تلفات کابل‌ها و تلفات فضای آزاد، مسیر مخابراتی در فرکانس مرکزی ۴۰۰/۶ MHz طراحی می‌شود.

نتایج بودجه مسیر محاسبه‌شده شامل توان خروجی و سیگنال به نویز در اندیس‌های مختلف که نشان‌دهنده قسمت‌های مختلف تقویت‌کننده‌ها و فیلترها در شکل (۲۴) می‌باشد، به ترتیب در شکل‌های (۲۶-۲۵) نشان داده شده است.



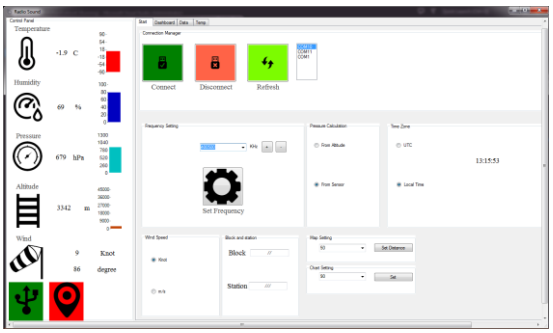
شکل (۲۵): توان خروجی در قسمت‌های مختلف مسیر ارتباطی رادیو سوند وگیرنده زمینی. شماره اندیس‌ها، نشان‌دهنده قسمت‌های مختلف نشان داده شده در شکل (۲۴) می‌باشد.



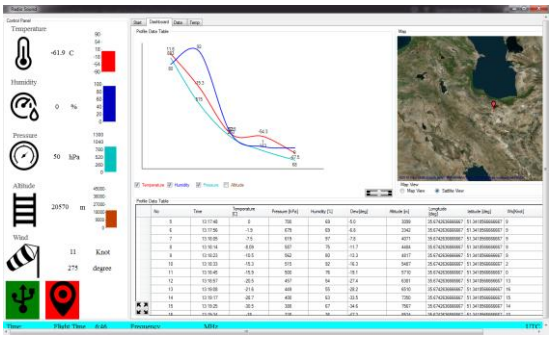
شکل (۲۶): سیگنال به نویز در قسمت‌های مختلف مسیر ارتباطی رادیو سوند وگیرنده زمینی. شماره اندیس‌ها، نشان‌دهنده قسمت‌های مختلف نشان داده شده در شکل (۲۴) می‌باشد.

۵. نرم‌افزار

به‌منظور نمایش و پردازش اطلاعات دریافتی توسط رادیوسوند، نرم‌افزاری به‌وسیله Visual Studio طراحی و نوشته شده که به‌وسیله ارتباط سریال، اطلاعات را از گیرنده دریافت و سپس بر روی قسمت‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل‌های (۲۸-۲۷) به‌ترتیب داشبورد نرم‌افزار و نمودارها و اطلاعات دریافتی توسط رادیوسوند نشان داده شده‌اند.



شکل (۲۷): داشبورد نرم‌افزار.



شکل (۲۸): نمودار ها و اطلاعات دریافتی توسط رادیوسوند.

۶. تست محیطی

قبل از راه اندازی رادیوسوند و تست سامانه در عمل و پایش شرایط جوی، باید در شرایط آزمایشی وضعیت حسگرها و عملکرد رادیوسوند را در دما و رطوبت‌های مختلف بسنجیم.

بدین منظور رادیوسوند را درون چمبر قرار داده و دما را تا ۷۰°C- پایین می‌بریم، همچنین در دماهای مختلف رطوبت را تغییر داده و پاسخ‌های رادیوسوند را مشاهده می‌کنیم. نتیجه آن شده است که رادیوسوند در تغییر دمای ۷۰ °C- تا ۴۰ °C+ و تغییر رطوبت در دمای۲۵ °C+ از ۰ تا ۱۰۰ درصد، پاسخ مطلوبی ارائه می‌کند.

۷. فرآیند راه‌اندازی سامانه رادیوسوند

در شکل (۲۹) مراحل آماده‌سازی و رهاسازی سامانه رادیوسوند نشان داده شده است. در ابتدا به‌وسیله کپسول هلیوم تهیه شده،

بالن g ۱۰۰را باد زدیم و سپس اقدام به رهاسازی بالن به همراه رادیو سوند کردیم.

شکل (۲۹): مراحل آماده‌سازی سامانه رادیو سوند.

۸. نتایج به‌دست‌آمده

با توجه به تست انجام شده، نتایج نشان داده شده در جدول (۷) به‌دست آمد. در این جدول، اطلاعات به‌دست‌آمده شامل زمان، دما، فشار، رطوبت، نقطه شبنم، ارتفاع، سرعت و جهت باد در فواصل هر دوثانیه نشان داده شده است. مجموعا در این تست ۹۵۷ بسته اطلاعات دریافت شد.

با توجه به ادوات فرستنده، گیرنده طراحی شده و بالن، اقدام‌های لازم برای تست رادیو سوند انجام و با توجه به شرایط بالن موجود، اطلاعات تا حدود m ۱۳۰۰۰ سطح زمین دریافت شد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تست عملی و نتایج به‌دست‌آمده از نمونه خارجی رادیوسوند ارسالی از ایستگاه مهرآباد تهران (نزدیک ترین ایستگاه به محل تست) که در همان روز و حوالی همان ساعت ارسال شده است، مشخص گردید:

- فرآیند تست درست بوده و اطلاعات به‌دست آمده تا ارتفاع حدود m ۱۳۰۰۰ با تقریب خوبی مورد قبول می باشد.
- به علت داشتن فقط یک نمونه بالن g ۱۰۰، امکان بالا رفتن بالن فقط تا ارتفاع حدود m ۱۵۰۰۰ مهیا بود.
- به علت تست یک نمونه دستگاه و عدم تجربه کافی طول نخ، اتصال مابین رادیو سوند و بالن کوتاه بود، این امر سبب می شد به علت چرخش دورانی بالن، رادیو سوند چرخش دورانی داشته باشد و جهت و سرعت باد به درستی تشخیص داده نشود.

جدول (۷): نتایج به‌دست‌آمده تست رادیوسوند بومی.

No	Time	Temp[C]	Press[hPa]	Hum[%]	Dew[drg]	Alt[m]	Ws[Knot]	Wd[drg]
1	14:32:56	15.7	893	36	0.6	1084	2	202
2	14:32:58	15.7	892	36	0.6	1090	2	207
3	14:33:00	15.8	891	36	0.7	1097	2	211
4	14:33:02	15.8	891	36	0.7	1103	2	216
5	14:33:04	15.8	890	36	0.8	1109	2	220
6	14:33:06	15.9	889	36	0.8	1116	2	223
7	14:33:08	15.9	889	36	0.9	1122	2	226
8	14:33:10	15.9	888	36	0.9	1128	2	229
9	14:33:12	15.9	888	36	0.9	1135	2	230
10	14:33:14	15.9	887	36	0.9	1141	1	231
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
948	15:04:30	-56.9	191	4	-76.5	12426	21	34
949	15:04:32	-57.1	189	4	-76.9	12502	21	35
950	15:04:34	-57.3	187	4	-77.4	12579	21	36
951	15:04:36	-57.6	185	4	-78.0	12657	21	36
952	15:04:38	-57.8	183	3	-78.6	12736	20	37
953	15:04:40	-58.0	181	3	-79.2	12815	20	38
954	15:04:42	-58.2	180	3	-79.9	12983	20	39
955	15:04:44	-58.4	178	2	-80.6	12970	19	40
956	15:04:46	-58.6	176	2	-81.4	13047	19	40
957	15:04:48	-58.8	174	2	-82.2	13123	19	41

۹. نتیجه‌گیری

در ایستگاه‌های هواشناسی، برای به‌دست آوردن اطلاعات مختلفی مثل فشار، دما، رطوبت، سرعت و جهت وزش باد در سطوح مختلف جو از دستگاه رادیوسوند استفاده می‌شود. این دستگاه هر ۶ ساعت یک‌بار توسط یک بالن کوچک به سطوح مختلف جو ارسال می‌شود. این دستگاه با استفاده از حسگرهایی که دارد پارامترهای مذکور را اندازه‌گیری می‌کند و با در ایستگاههای هواشناسی، برای به‌دست آوردن اطلاعات مختلفی مثل فشار، دما، رطوبت، سرعت و جهت وزش باد در سطوح مختلف جو از دستگاه رادیوسوند استفاده می‌شود. این دستگاه هر ۶ ساعت یک‌بار توسط یک بالن کوچک به سطوح مختلف جو ارسال می‌شود. این دستگاه با استفاده از حسگرهایی که دارد پارامترهای مذکور را اندازه‌گیری می‌کند و با استفاده از GPS موقعیت خود را نیز در هر لحظه به‌دست می‌آورد. سپس از طریق یک فرستنده رادیویی (RF) اطلاعات و موقعیت را به ایستگاه زمینی ارسال می‌نماید تا با بهره‌برداری از اطلاعات حاصله بتوان پیش‌بینی درستی از شرایط جوی انجام داد. در این مقاله، طراحی و ساخت قسمت‌های مختلف فرستنده یک رادیوسوند و گیرنده زمینی آن به تفصیل توضیح داده شده است. همخوانی نتایج تست‌های انجام شده با نمونه‌های خارجی حاکی از عملکرد صحیح رادیوسوند بومی کشوری است.

قدردانی

از حمایت مالی معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری (بخش میکروالکترونیک) قدردانی و تشکر می‌شود. ضمنا از حمایت و پشتیبانی سازمان هواشناسی ایران برای انجام اندازه‌گیری‌های رادیو سوند به خصوص زحمات جناب آقای مهندس اکبر تقدیر و تشکر می‌شود.

۱۰. مراجع

1. W. F. Dabberdt, R. Shellhorn, H. Cole, A. Paukkunen, J. Hörhammer, and V. Antikainen, “Radiosondes,” Vaisala Inc., National Center for Atmospheric Research, pp. 1900-1913, 2002.
2. M. Segal, R. Turner, D. Todey,” Using Radiosonde Meteorological Data to Better Assess Air Conditioning Loads in Tall Buildings,” Energy and Buildings, Vol 31, No. 3, pp. 243-250, 2000.
3. J. Nash, C. Gaffard, R. Smout and M. Smees, “Introduction to Upper Air Measurements with Radiosondes and other in Situ Observing Systems,” Integrated Ground-based Observing Systems Applications for Climate, Meteorology and Civil Protection, Italy, 2007.
4. Y. Shi, Y. Luo, W. Zhao, C. Shang, Y. Wang, Y. Chen, “Radiosonde Using a Humidity Sensor Array with a Platinum Resistance Heater and Multi-Sensor Data Fusion,” Sensors Journal, Vol. 13, No. 7, pp. 8977-8996, 2013.
5. W. H. Pickering, “The Radio Sonde,” Proceedings of the IRE, Vol. 31, No. 9, pp. 479-485, 1943.
6. GPS-Based Measurement of Height and Pressure with Vaisal a Radiosonde RS41, White Paper.
7. C. Kilgus, "Multielement, Fractional Turn Helices," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 16, No. 4, pp. 499-500, 1968.
8. C. Kilgus, "Resonant Quadrifilar Helix design," Microwave Journal, Vo. 13, pp. 49-54, 1970.

Journal of Applied Electromagnetics

Vol. 7, No.2, 2020 (Serial No. 19)

Design and Fabrication of an Atmospheric Parameter Monitoring System for Weather Forecast

Z. Ghattan Kashani*, S. A. Izadi, M. J. Siahkari

K. N. Toosi University of Technology

(Received: 03/05/2019, Accepted: 15/07/2019)

Abstract

Measurement of the air parameters above the Earth's surface has many research and operational applications including weather forecast. A radiosonde system is carried by a balloon up to the top of the troposphere or above it and obtains various information such as pressure, humidity, temperature, location, velocity, and wind direction at different altitudes from the Earth's surface during its climb. Then, the measured data are transmitted to the ground station using a radio transmitter. In this paper, the system design and fabrication and testing steps of a radiosonde operating at 400.6 MHz with the ground receiver and the associated antenna are described in detail. The aim of the project is to build a local radiosonde system to meet the requirements of the meteorological organization. Although the price of this system is very low compared to its foreign equivalent, its measured performance and stability under severe temperature changes are in good agreement with those of foreign counterparts.

Keywords: Radiosonde, Weather Forecast, Temperature and Humidity Sensor, Pressure Sensor, GPS, Power Amplifier, Ground Receiver, Link Budget

* Corresponding author E-mail: z.ghattan@kntu.ac.ir