



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

“TITOLO”

**Progettazione di un circuito elettronico per la triangolazione
con tecnologia ARTVA per soccorso valanghivo**

Relatore: Prof. Andrea Cester

Laureando/a: Varotto Nicolò

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 16/11/2022

Abstract

Negli ultimi anni le attività sportive invernali hanno mostrato un trend in aumento soprattutto quelle praticate in ambiente alpino non controllato. Oltre ai pericoli dovuti all'inesperienza e ad un'eccessiva sicurezza, il cambiamento climatico rappresenta un problema critico, ponendo l'Uomo davanti a fenomeni naturali spesso imprevedibili e difficili da limitare, creando così di fatto, una minaccia anche per i più esperti. In questa categoria di rischi, quelle probabilmente più dannose e incontrollabili, sono le valanghe e slavine che interessano vaste scale di territorio alpino.

La rapida localizzazione delle persone sepolte è essenziale nelle operazioni di salvataggio.

Il tasso di mortalità aumenta rapidamente con il tempo, poiché la sopravvivenza scende al 60% dopo 15 minuti. In questo contesto il progetto Seals ("Safety and Environment monitoring with Atmospheric sensors and Localization Systems") prevede lo sviluppo di un sistema di tracciamento autonomo implementabile in piccoli droni che, sfruttando ricetrasmittitori ARTVA e la presenza di schemi di rilevamento rapido permettono la localizzazione di persone sepolte.

Nel primo capitolo si descrivono brevemente i processi valanghivi, i dati legati alla sopravvivenza e ai tempi di soccorso, i kit in dotazione di chi pratica sci alpino, e il principio di funzionamento della tecnologia ARTVA.

Si pone particolare attenzione alle procedure necessarie per individuare il segnale e alla duplice funzione di ricevitore e trasmettitore del dispositivo utilizzato.

Nel secondo capitolo si affrontano le tematiche di qualità della trasmissione del segnale in ambiente alpino, le interferenze dovute alla strumentazione su cui poggia il circuito e le antenne. Brevi cenni sui segnali e la loro trasmissione, e un approfondimento del sistema di antenne utilizzato dal punto di vista fisico.

Nel terzo capitolo si motivano le scelte eseguite in fase di sviluppo e il funzionamento dei vari circuiti, a partire da quelli di alimentazione e successivamente quelli di amplificazione e filtrazione.

Breve premessa su alcune condizioni di lavoro che hanno portato a parametri di costruzione differenti per i vari componenti.

Infine si descrive la struttura del circuito stampato e alcune problematiche sorte durante il suo sviluppo.

Indice

Capitolo 1 - Valanghe e incidenti	8
1.1 Origine e decorso.....	8
1.2 Incidenti e sopravvissuti: statistiche.....	9
1.3 Kit di soccorso.....	11
1.4 Implementazione e sviluppo.....	13
Capitolo 2 - La struttura	15
2.1 I segnali e le onde.....	15
2.2 Il percorso delle onde	16
2.2.1 Trasmettitore.....	16
2.2.2 Ricevitore.....	18
2.3 Antenna	18
2.4 Interferenze e disturbi.....	21
2.4.1 Test trasmissione ARTVA.....	21
2.4.2 Test interferenze prodotte dal drone	24
Capitolo 3 - Circuito di amplificazione e filtrazione	26
3.1 Analisi del circuito	26
3.1.1 Circuito di alimentazione $\pm 12V$	26
3.1.2 Circuito di alimentazione $+5V$	29
3.2 Premessa sul sistema di amplificazione e filtrazione	31
3.2.1 Amplificatore strumentale da strumentazione	33
3.2.2 Commutazione e filtrazione.....	36
3.2.3 Amplificatore operativo e riduzione del rumore	39
3.3 Sviluppo circuito stampato	41

Elenco di acronimi

AC: Corrente alternata

AO: Amplificatore operativo

ARTVA: Apparato di Ricerca dei Travolti in VALanga

BJT: Transistor a giunzione polare

DC: Corrente continua

d.d.p: differenza di potenziale

EM: Elettromagnetico (Campo)

EMI: Interferenze elettromagnetiche

ESC: Controllo di velocità elettronico

f.e.m.: Forza elettromotrice

GND: Ground o terra

IC: Circuito Integrato

RF: Radio frequenza

RX: Ricezione

SDR: Software Defined Radio

Seals: Safety and Environment monitoring with Atmospheric sensors and Localization Systems

SLF: Istituto federale per lo studio della neve e delle valanghe

Smd/Smt: Surface-Mounted Device

SNR: Rapporto segnale rumore

Tht: Through Hole

TX: Trasmissione

Capitolo 1

Valanghe e incidenti

1.1 Origine e decorso

Le valanghe si formano quando il rapporto tra le tensioni del manto nevoso si alterano, ovvero quando la forza di gravità ed eventuale forza peso esterna agiscono sul pendio superando le forze di coesione che agiscono in senso opposto. Il raggiungimento del carico di rottura, corrisponde alla rottura dei legami tra le particelle (rottura iniziale) e conseguente alterazione dell'equilibrio interno del manto nevoso.

La coltre nevosa che ricopre una superficie tale da avere una pendenza sufficiente ($>30^\circ$) è soggetta a scorrimento, e in funzione alle condizioni di aderenza fra neve e terreno, a slittamento lungo la superficie del terreno (*figura 1.1*) [1][2].

v (u, v, w) vettore risultante della velocità
 u componente parallela al pendio, della velocità
 u_u velocità di slittamento
 $u-u_u$ velocità di scorrimento parallela al pendio
 w velocità di scorrimento perpendicolare al terreno

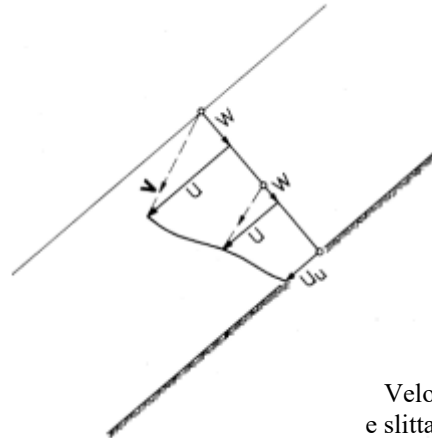


Figura 1.1
Velocità di scorrimento
e slittamento coltre di neve

Questi moti sono strettamente legati ai seguenti fattori:

- Pendenza e rugosità del terreno
- Spessore coltre nevosa
- Caratteristiche della neve (deformabilità, attrito e, in particolare, contenuto d'acqua di contatto fra terreno e neve)
- Temperatura
- Precipitazioni (neve fresca aumenta il rischio, pioggia aumenta temperatura e carico supplementare)
- Vento (trasporto di neve e conseguenti accumuli)

Se tali fattori non presentano variazioni locali, i profili della velocità devono risultare ovunque identici. In questo caso, il peso della coltre nevosa si trasmette in ogni punto direttamente al suolo come pressione normale e tensione di taglio.

Questo è lo stato della cosiddetta zona neutra, caratterizzata dall'assenza di variazioni di tensioni nelle direzioni parallele al pendio. Le variazioni locali dei citati fattori determinano zone di maggior tensione di trazione, di compressione e di taglio nei piani perpendicolari al pendio.

1.2 Incidenti e sopravvissuti: statistiche

Per incidente da valanga si intende qualsiasi situazione generata da un evento valanghivo (anche di dimensioni ridotte) che abbia prodotto il coinvolgimento di una o più persone, anche nel caso in cui i coinvolti rimangano illesi.

Dal 1960 l'SLF raccoglie i dati relativi agli incidenti da valanga per tutti i paesi alpini.

Le statistiche più importanti sono qui presentate in una breve panoramica.

Si precisa che sono state considerate soltanto le persone completamente sepolte, registrate nei mesi da dicembre ad aprile in zone di fuori pista (il 10% delle vittime non erano sepolte oppure lo erano solo parzialmente e non sono riportate nel grafico). Il motivo è puramente statistico, si vogliono evidenziare gli aspetti e le problematiche legate all'individuazione di dispersi non visibili con il solo occhio umano, ma con l'ausilio di tecnologia ARTVA, e quindi in presenza di grandi quantità di neve (tipiche dei mesi invernali)[1][4].

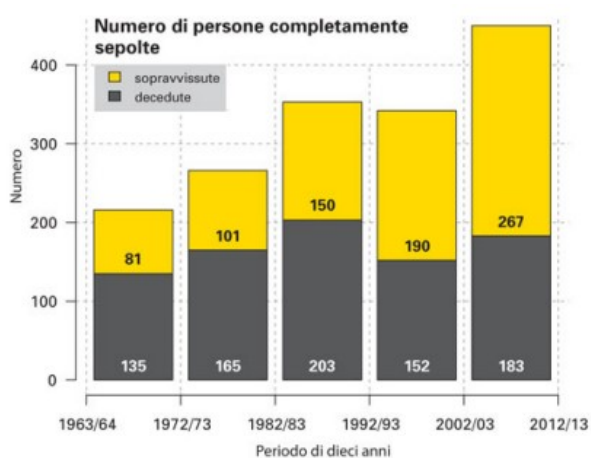


Figura 1.2.a

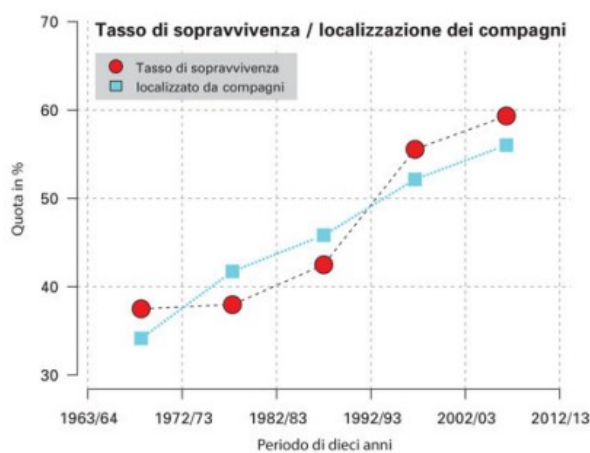


Figura 1.2.b

Nonostante, negli ultimi cinquant'anni, sia aumentato anche il numero di persone sepolte sotto la neve con esito potenzialmente mortale, il numero delle vittime è sostanzialmente rimasto invariato o persino lievemente diminuito (*figura 1.2.a*). Il tasso di sopravvivenza delle persone completamente sepolte è aumentato di conseguenza (*curva rossa, figura 1.2.b*). Sebbene il soccorso prestato da compagni rivesta un'importanza sempre maggiore, in caso di valanghe con recupero di persone completamente sepolte, nel 90 per cento dei casi è stato mobilitato anche il soccorso organizzato. Nello stesso periodo, sempre più persone travolte sono state localizzate da compagni (*curva azzurra, figura 4.b*), il motivo è facilmente giustificato dall'utilizzo sempre più frequente della tecnologia, e dall'attrezzatura più efficace. La causa di morte più frequente per i sepolti è l'ipossia e l'ipercapnia, perché chi rimane sepolto spesso non ha a disposizione una sacca d'aria o ne ha una molto piccola [4].

La sopravvivenza è quindi strettamente correlata al tempo di seppellimento, con circa il 90% di successo salvataggi quando le vittime vengono estratte prima di 8 minuti dall'evento. Di conseguenza, già dopo 15 minuti le probabilità di sopravvivenza di una persona completamente sepolta si riducono drasticamente, scendendo al 60% (*figura 1.3*).

La veloce localizzazione e liberazione di un sepolto da parte dei compagni assume quindi un'importanza fondamentale, considerando che le squadre di ricerca e soccorso prevedono tempi di intervento più lunghi, e molto spesso il segnale non consente di effettuare chiamate di emergenza. È necessario anche considerare che è frequente l'assenza di indizi visivi della persona sepolta in questione, e l'evento valanghivo spesso provoca ferite e traumi che rendono il disperso incosciente o impossibilitato a richiedere aiuto. È quindi necessario adottare o una metodica probabilistica (cercando il disperso senza uno schema preciso), o utilizzare un apparecchio ARTVA che, sfruttando la trasmissione dei segnali permette una più facile individuazione [1][3].

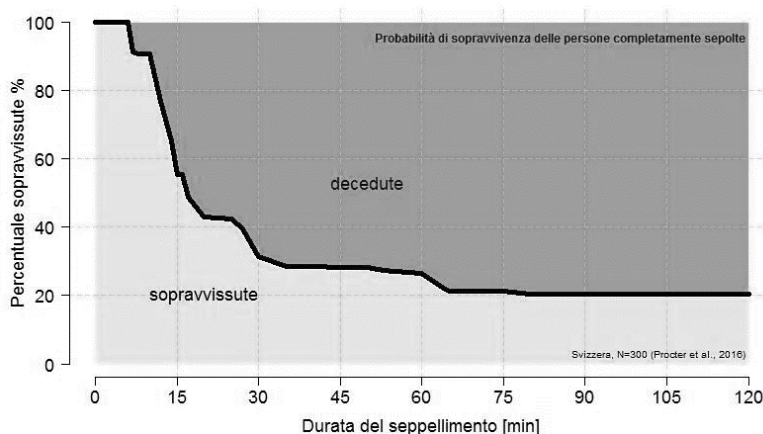


Figura 1.3
Percentuale delle persone completamente sepolte in zone fuoripista, che sono sopravvissute dal 2005/06 al 2012/13. Sono state considerate tutte le persone completamente sepolte e non sono morte per ferite da traumi.

1.3 Soccorso e kit

Si stima che per avere una maggior possibilità di sopravvivenza, il travolto debba essere rintracciato e disseppellito entro 15 minuti dall'evento (per avere buone probabilità di successo). È quindi necessario ridurre la finestra temporale di ricerca, a favore della fase di estrazione. Dal 1° gennaio 2022, è in vigore in Italia un decreto legislativo, che obbliga l'utilizzo di un kit di soccorso chiamato 'APS' per chi pratica qualsiasi attività in ambiente alpino non protetto. L'equipaggiamento individuale è composto da [3][5]:

- ARTVA (*figura 1.4*)
- Pala
- Sonda



Figura 1.4
Kit di soccorso

Ancora non molto comune e obbligatorio, è lo zaino con dispositivo Airbag (innesco rapido che nasconde al proprio interno un pallone che si gonfia in circa 3 secondi tirando una leva).

La pala per essere efficace, dovrebbe essere fatta in metallo, esistono anche varianti in plastica o altri materiali ma non garantiscono le medesime prestazioni nella neve compatta.

La sonda ripiegabile su sé stessa, può essere in alluminio, titanio o carbonio e permette di guadagnare lassi di tempo considerevoli durante la ricerca puntuale.

Il sistema di segnalazione da valanga (ARTVA) è il dispositivo su cui verte il progetto SEALS e ha la funzione duale di:

- trasmettitore (TX), utilizzato inizialmente da tutti i membri
- ricevitore (RX), modalità commutata qualora sia necessario ricercare uno o più travolti.

Lo strumento è in grado di emettere e ricevere un segnale elettromagnetico, ad una frequenza riservata di 457kHz nel raggio di 20 metri (caratteristica variabile, fornita dal produttore).

Il campo magnetico generato dal momento di dipolo magnetico è formato da linee di forza chiuse (*figura 1.5*), che si diramano dalle due estremità dell'antenna (polo superiore) nelle tre direzioni dello spazio (componente TX) [3][6].

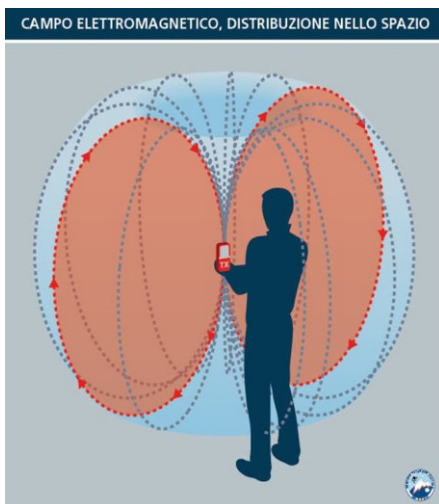


Figura 1.5

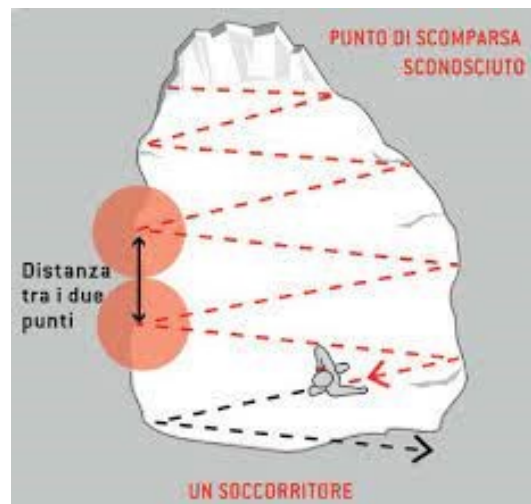


Figura 1.6

La funzione RX, trasforma invece il segnale ricevuto dal trasmettitore in due valori:

- Distanza (d) tra RX e TX, calcolata come l'inverso di intensità del segnale
- Angolo (θ) tra la direzione RX e la linea tangente alle linee del flusso.

I quali vengono convertiti in una indicazione visiva e acustica.

Solitamente sono composti da due antenne, ma alcuni produttori ne utilizzano tre.

Si specifica che quando l'ARTVA viene commutato in modalità RX, dopo un tempo 't' definito inizialmente, torna automaticamente in modalità TX, questo per evitare che durante la fase di ricerca, in caso di nuovo evento valanghivo venga disperso il compagno impiegato nella ricerca, e non possa essere rintracciato tramite ARTVA.

In caso invece di più dispersi, si sfrutterà lo sfasamento del segnale per determinare e distinguere i diversi dispositivi ARTVA, consentendo così di procedere con le operazioni di salvataggio

Di fondamentale importanza, sono le modalità di ricerca per l'individuazione di altri dispositivi ARTVA (e quindi di dispersi). Esistono diversi metodi, ma il più utilizzato è il 'movimento a greca' o 'delle diagonali' (figura 1.6) che prevede la ricerca segmentata nella zona di evento valanghivo per captare il segnale, la distanza tra i due punti, viene consigliata da produttore. La fase successiva all'individuazione di una linea di flusso, è seguire quest'ultima per arrivare alla sorgente. È necessario che durante queste fasi, si ruoti l'ARTVA lentamente per trovare la migliore condizione di ricezione del flusso magnetico [3][6].

Queste informazioni sono fondamentali per la progettazione dell'algoritmo di ricerca che verrà implementato nel drone, consentendo così un rilevamento il più efficiente possibile.

1.4 Implementazione e sviluppo con il progetto SEALS

Avendo ora un quadro più generale dell'ambiente in cui si opera, degli strumenti necessari per intervenire e delle tempistiche richieste per il soccorso, si può definire il progetto SEALS e i suoi obiettivi.

Lo scopo è sviluppare un drone dotato di un sistema di localizzazione automatica di ARTVA in ambiente alpino, che abbia le caratteristiche di versatilità e compattezza, così da renderlo idoneo alle condizioni ambientali estreme in cui si opera. La localizzazione deve avvenire in tempi ridotti (meno di un minuto) e il peso deve essere di massimo 500g.

La prima area di studio è la progettazione di un'antenna in grado di ricevere il segnale emesso dal sistema ARTVA (in modalità TX), che sia amplificata e filtrata per ridurre e/o eliminare le interferenze e i disturbi.

Il secondo ambito di progettazione, è l'elaborazione digitale dei dati ricevuti e lo sviluppo di un algoritmo che risponda in funzione alle informazioni processate.

L'ultimo stadio, è l'individuazione di una modalità di ricerca iniziale per localizzare un primo segnale e la scrittura di un codice in grado di rendere il drone autonomo nel volo (in particolare quando viene ricevuto un segnale, è necessario che sappia seguirlo fino alla sorgente).

Per ogni sotto processo è necessario eseguire simulazioni e test sia in laboratorio che in montagna. Questo, per ricreare un ambiente il più possibile simile a quello in cui il drone andrà ad operare; come successivamente si vedrà, le basse temperature, la neve, e anche i semplici motori del drone rivestono un ruolo fondamentale nelle interferenze e nella trasmissione del segnale.

È necessario precisare che per i test, inizialmente si sono utilizzati mezzi semplificati e non ottimizzati, ma utili a stimare buona parte dei dati raccolti posti poi come punto di partenza per il progetto. Il drone impiegato e ancora in uso è un quadricottero Tarot 650, che permette di sostenere un carico aggiuntivo di 1 kg e che ha permesso di testare un primo modello dell'antenna.

Nelle versioni successive e ottimizzate, si è scelto di utilizzare un drone Holybro Pixhawk QAV 250, più piccolo e versatile.

Lo sviluppo di queste fasi richiede numerose conoscenze, si è perciò diviso il team in macro aree identificate dall'area di sviluppo, e ciascuna con compiti precisi:

- Telecomunicazioni (antenna e segnale)
- Elettronica (circuiti di filtrazione e amplificazione)
- Informatica (elaborazione dati e sviluppo di algoritmi)
- Meccanica (costruzione di supporti per il drone)



Figura 1.7 Drone Tarot 650, ripreso in volo durante i test svolti a Cortina, 10/12/2021



Capitolo 2

Antenna e interferenze

2.1 I segnali e le onde

I ricetrasmittitori ARTVA sfruttano come descritto nella sez. 1.3 la frequenza di 457KHz per comunicare tra loro. Il vettore dell'informazione è l'onda elettromagnetica, e non necessita di un mezzo materiale per propagarsi. I campi elettrico e magnetico infatti si generano per mutua induzione anche nel vuoto.

Un'onda è un'oscillazione periodica in moto che si trasmette nello spazio implicando trasporto di energia e non di materia, quelle che interessano le comunicazioni radio sono quelle hertziane o onde radio (figura 2.1), una piccola parte dello spettro delle irradiazioni EM. A seconda delle frequenze, varia il comportamento e le proprietà dell'onda.

Tutta la gamma di queste frequenze, è denominata radio frequenza (RF) o alta frequenza (AF).

La frequenza degli ARTVA appartiene alla categoria onde medie (MF) [7][9].

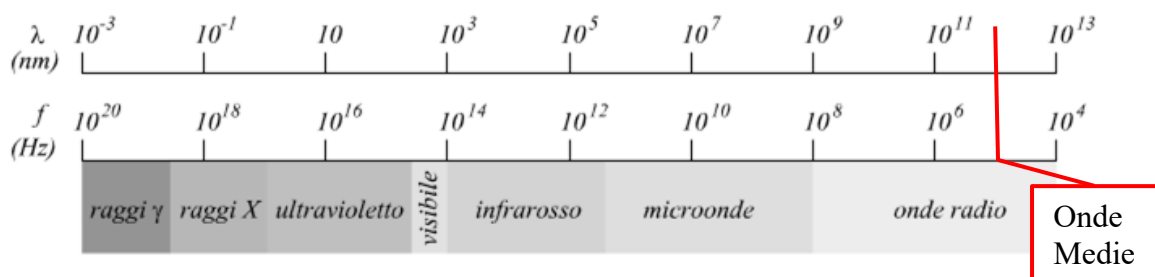


Figura 2.1

In generale, la propagazione delle onde può essere descritta mediante i parametri: ampiezza, lunghezza d'onda e frequenza.

- L'ampiezza (A) rappresenta la distanza del massimo della cresta dall'asse di propagazione dell'onda.
- La lunghezza d'onda (λ) rappresenta la distanza percorsa dall'onda in un periodo T (intervallo di tempo, in secondi, impiegato per compiere un'oscillazione completa)
- La frequenza (ν) indica il numero di oscillazioni complete in 1 secondo e si misura in hertz (Hz). Si definisce come l'inverso del periodo $f = \frac{1}{T}$
- La velocità di propagazione (c) che coincide con la velocità della luce, in relazione con gli altri parametri: $c = \lambda \cdot f$

Importante la relazione dell'energia dell'onda con la costante di Planck (h): $E = h \cdot f$. [7]

Le onde elettromagnetiche sono costituite da un campo magnetico (B) e un campo elettrico (E) che si propagano perpendicolarmente tra di loro, la direzione di trasmissione dell'onda è quindi perpendicolare a entrambi i campi (*figura 2.2 e figura 2.3*) [8].

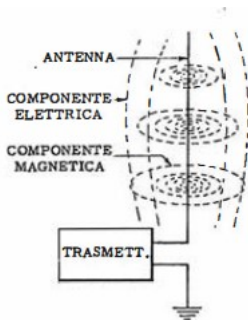


Figura 2.2

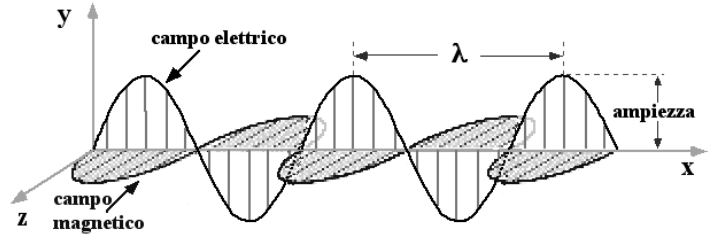


Figura 2.3

2.2 Il percorso delle onde

La comunicazione radio (*figura 2.4*) nasce in un determinato punto: trasmettitore (ARTVA).

Per mezzo di una o più antenne, viene irradiata a tutto lo spazio circostante e viene quindi sempre con un'antenna, captata, per pervenire al punto di ricezione: ricevitore (Drone e sistema di antenne) [7].

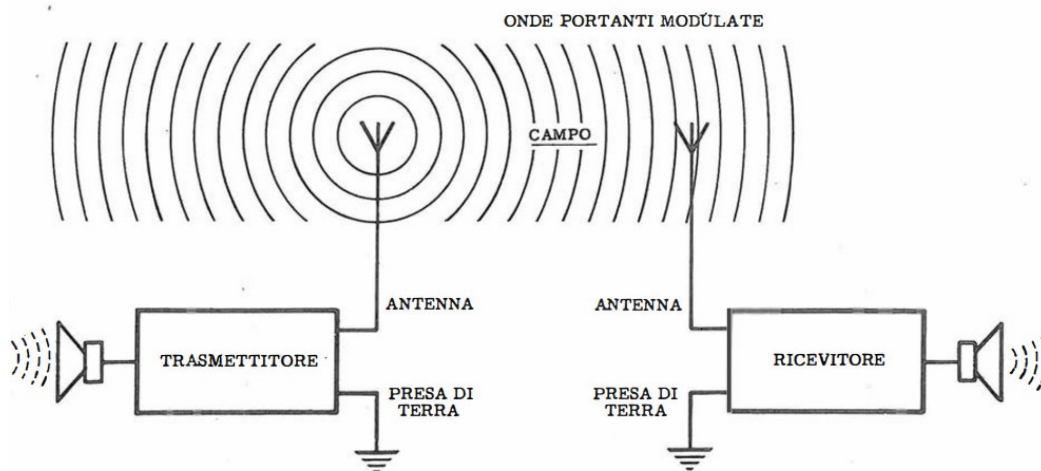


Figura 2.4

2.2.1 Trasmettitore

Il dispositivo utilizzato, è composto da diverse sezioni coordinate allo svolgimento di una data funzione (*figura 2.5*).

Il primo stadio è un generatore di oscillazione elettromagnetica di debole intensità, che garantisca la stabilità massima della frequenza scelta (*figura 2.5 Azzurro*). Questo parametro è garantito fornendo bassa energia all'oscillatore (*figura 2.5 Verde*). Se si usassero potenze troppo alte, si potrebbe incorrere nella formazione di fenomeni di riscaldamento che andrebbero ad alterare la stabilità del dispositivo.

A seguire è necessario l'utilizzo di un sistema di amplificatori per accrescere la potenza del segnale (*figura 2.5 Rosso*) e di filtri che isolino le frequenze desiderate eliminando e attenuando i disturbi esterni (*figura 2.5 Giallo*).

L'oscillazione che si ottiene in uscita, generata e amplificata ha nell'antenna il suo punto di partenza per la propagazione.

Nell'ARTVA si possono individuare tre antenne in ferrite ortogonali tra loro, sintonizzate alla frequenza di risonanza, associate a dispositivi attui a porle in condizione di irradiare il massimo dell'energia che il trasmettitore può fornire loro [10].

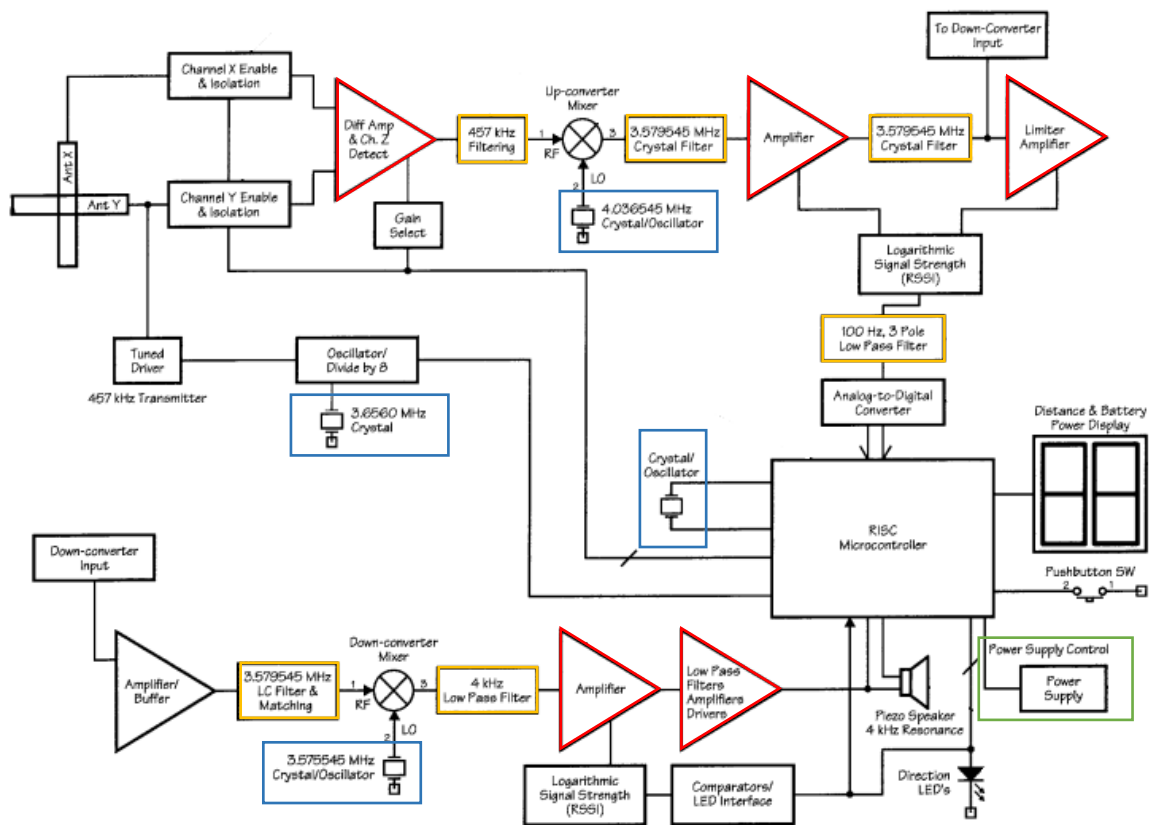


Figura 2.5

Si specifica che questo è il circuito di un ARTVA analogico e svolge quindi la duplice funzione di ricevitore ed emettitore.

2.2.2 Ricevitore

Il ricevitore, ha la funzione inversa del trasmettitore, ovvero captare attraverso una o più antenne il segnale, e convertirlo in informazione utile per essere successivamente elaborata.

Se il ruolo di trasmissione è affidato al dispositivo ARTVA, si riconosce invece la funzione di ricezione al drone di soccorso sviluppato dal team SEALS.

Il primo mezzo sviluppato è l'antenna, posta nelle vicinanze o all'interno del campo elettromagnetico emesso dal dispositivo del disperso, si andranno a descrivere sia la sua struttura, che le scelte e accorgimenti in fase di progettazione e test nella sezione successiva [7][9].

2.3 Antenna

Utilizzando un drone in grado di muoversi lungo tutti e tre gli assi, è necessario ricreare un ambiente di ricezione dati tridimensionale, così da riuscire ad individuare l'intensità del segnale, e a poterlo triangolare per dedurre la sorgente.

Si è scelto quindi di utilizzare tre antenne ortogonali (figura 2.6), in grado di interpolare i dati raccolti del campo magnetico (che si ricorda essere una grandezza vettoriale ($\vec{B} = B [x,y,z]$) nello spazio \mathbb{R}^3), e fornire le componenti della sua intensità lungo le tre direzioni del piano cartesiano. Un algoritmo sviluppato dal team informatici provvederà poi a generare un vettore del campo magnetico per facilitare l'individuazione della sorgente. Questa, si ritiene essere la soluzione ottimale. Inoltre le antenne a ricezione singola sono in grado di rivelare solo la potenza del segnale, e ciò porterebbe il drone a muoversi secondo uno schema pseudo-casuale per individuarne le variazioni.

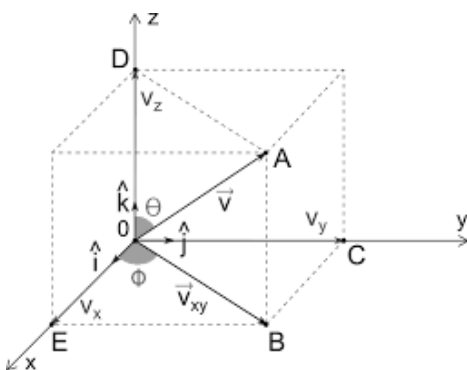


Figura 2.6

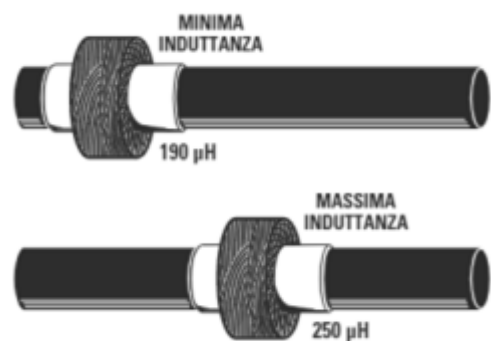


Figura 2.7

Esistono vari tipi di antenna, ma si è scelto di utilizzare il sistema utilizzato dall'ARTVA stesso (e da tutti i ricevitori portatili), ovvero un'asta il cui nucleo di ferrite (composto da ossido di ferro – nichel – zinco – manganese) è avvolto da 210 spire di filo di rame (*figura 2.7*).

Ha la caratteristica di concentrare i segnali RF emessi da un'emittente sulla bobina avvolta sul suo corpo, ottenendo così una sensibilità tale per cui non è più necessario il supporto di un'antenna esterna. La miscela permette di lavorare da circa 90 KHz a 3 MHz, quindi utile a captare onde lunghe e medie.

Altro parametro fondamentale è la posizione della bobina sul nucleo, in base alla sua disposizione varia il valore della sua induttanza (μH). Come si può osservare dalla *figura 2.7*, aumenta con il posizionamento centrale, mentre diminuisce ponendolo a una delle due estremità.

Si è scelto quindi di mantenere una disposizione che ne aumentasse l'induttanza.

È necessario inoltre non utilizzare supporti metallici per il fissaggio dell'antenna, evitando così cortocircuiti del segnale RF.

Le caratteristiche tecniche dell'asta utilizzata (*figura 2.8*) sono:

- Diametro filo di rame: 0,5mm
- Lunghezza asta ferrite: 195mm
- Lunghezza tratto di asta avvolto: 100mm \pm 0,90mm
- Diametro asta ferrite: 8mm \pm 0,05mm

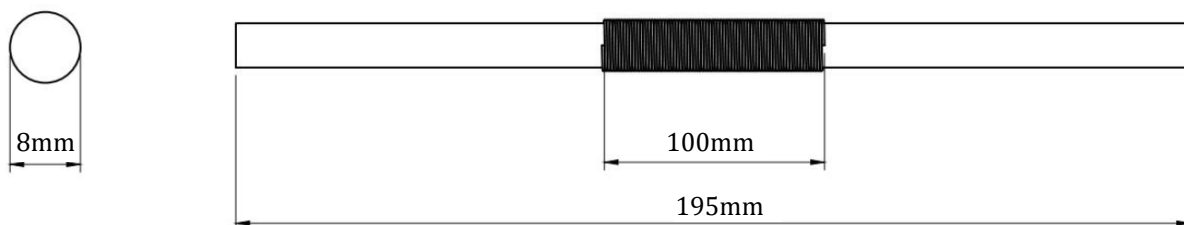


Figura 2.8
Non in scala

Con la seguente formula è possibile ottenere il valore dell'induttanza teorico

$$L = \mu_0 \mu_{\text{rod}} \frac{N^2 A}{l} 10^4 \quad [\mu\text{H}] \quad (2.1)$$

N = Numero di spire = 210 spire

A = Sezione di area trasversa [cm^2]

l = Lunghezza tratto di asta avvolto [cm]

μ_0 = Permeabilità nel vuoto [.] = $4\pi 10^{-7}$

μ_{rod} = Permeabilità asta [.] = 18 (valore tabellare)

Si ottiene così (dall'equazione 2.1) il valore 500 μH , diverso da quello sperimentale (491,57 μH) misurato con un tester LCR. Questa differenza, è dovuta alla permeabilità che dipende dalle effettive dimensioni del nucleo (e sua composizione), e dal passo non sempre uniforme applicato nell'avvolgimento.

Il circuito dell'antenna è un parallelo LC, si può quindi individuare il valore della capacità utilizzando la frequenza di risonanza a cui si vuole sincronizzare il circuito ($f = 457\text{KHz}$) e l'induttanza sperimentale individuata.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_f C}} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{1}{L_f (2\pi f_0)^2} \quad (2.3)$$

Utilizzando l'equazione 2.3 si individua il valore 242,57pF.

Si è comunque utilizzato un condensatore variabile in fase di prototipazione per confermare il valore teorico con quello sperimentale.

Il fattore di merito, o coefficiente di risonanza è un parametro adimensionale fondamentale da calcolare per determinare l'efficienza dell'antenna, e dovrebbe avere un valore alto alla frequenza in cui si opera. Rappresenta il tasso di perdita di energia inferiore rispetto all'energia immagazzinata dal risonatore, ovvero quanto le oscillazioni si estinguono più lentamente. È dato dal rapporto fra la reattanza induttiva della bobina $X_L (=2\pi f_0 L_f)$ e le sue perdite, dovute alla resistenza ohmica e termica R. $[9] / 100\text{ohm}$ resistenza

$$Q = \frac{2\pi f_0 L_f}{R_{\text{tot}}} \quad (2.4)$$

Da 2.4 si ricava $Q = 0.72$, posto $R_{\text{tot}} = R + R_f + R_r = 2 \text{ KHz}$

Il valore trovato è molto basso e indica che l'antenna lascia passare tutte le basse frequenze, portando a un peggioramento delle prestazioni del sistema. Sarà necessario scegliere una ferrite che alla frequenza interessata presenti una resistenza minore a risonanza in modo da massimizzarne la selettività.

2.4 Interferenze e disturbi

Un'interferenza indica la sovrapposizione di un segnale indesiderato nella ricezione di un segnale informativo trasmesso, con effetto finale di distorsione [13].

Il rumore (noise) è un segnale di andamento casuale nel tempo, che si sovrappone al segnale utile e pertanto ne influenza l'intelligibilità; a causa del rumore si ha quindi un limite al di sotto del quale il segnale utile non è più rilevabile in modo soddisfacente [7].

Da evidenziare la differenza tra 'rumore' ed 'interferenza', entrambi infatti rappresentano una fonte di degradazione del segnale utile ma il primo a differenza dell'altro non trasporta alcun tipo di informazione.

2.4.1 Test di Ricetrasmisione ARTVA

Si è proceduto ad effettuare dei test qualitativi e quantitativi per determinare i disturbi in alta montagna (località: Cortina, BL) avvalendosi di due ricetrasmittitori ARTVA 'Mammut Barryvox® S' in trasmissione e ARTVA 'Pipes', due modelli con duplice funzione analogica e digitale.

Le caratteristiche fornite dal produttore sono portate rispettivamente di 70 e 80 metri [10]. Per verificare tale dato e la precisione effettiva, si è scelta un'area libera di almeno 6000 mt² su manto nevoso priva di disturbi esterni significativi (tra cui cavi di alta tensione, strutture metalliche).

Si è proceduto poi a tracciare e suddividere la distanza tra i due dispositivi (50mt totale) in blocchi da 5mt e 10mt progressivamente, e con un diverso orientamento (paralleli, 90°, 180°).

Tutte le misure sono state effettuate precedentemente anche in laboratorio presso l'Università degli studi di Padova.

Distanza (m)	Media misure in laboratorio	Media misure in montagna in presenza di neve
5	5	5.9
10	10	13
15	16	23
20	23	32
30	36	51
40	47	69
50	55	-

Tabella 2.1, media dei valori raccolti a diverse distanze

Si può osservare dai dati raccolti (*tabella 2.1*), che all'aumentare della distanza tra i due dispositivi aumenta l'errore relativo alla precisione. Questa differenza è ancora più marcata in presenza/assenza di neve. Si può attribuire questo peggioramento del segnale alle basse temperature (0-5°C) che alterano il funzionamento dei componenti elettronici, all'effetto schermante della neve e alla pendenza del terreno (replica con buona precisione la situazione reale di ricerca del disperso).

Inoltre la differenza tra le misure eseguite in montagna e in laboratorio, è probabilmente da attribuire all'utilizzo di due ARTVA diversi (Pipes e Mammut, quest'ultimo più preciso).

Si è inoltre osservato che indipendentemente dall'orientazione dei dispositivi, i valori ricavati sono molto simili e non alterano il segnale, anche se la massima precisione si ottiene quando i due dispositivi sono ortogonali tra loro. Questo è sicuramente dovuto all'utilizzo di un sistema di antenne tridimensionale.

Si è poi proceduto ad eseguire test simulando possibili casi reali, ponendo un ARTVA sepolto inizialmente a 50cm di profondità e successivamente a 100cm, e infine a contatto con un dispositivo elettronico (smartphone) che il disperso può avere con sé [16].

Distanza (m)	Media misure 100cm profondità di neve	Media misure in superficie con smartphone	Media misure 100cm profondità con smartphone
5	6	7,1	6,5
10	13	16	14,6
15	22,6	25	24
20	31,3	35,6	40,6
30	57,5	57,3	57,5

Tabella 2.2, media dei valori raccolti con e senza smartphone, a diverse profondità

Si può osservare che la presenza di un dispositivo elettronico aumenta sensibilmente l'imprecisione della misura, e la condizione di seppellimento non rappresenta una diminuzione notevole del segnale ricevuto.

A seguire una breve panoramica riassuntiva sui dati raccolti (*grafico 2.1*).

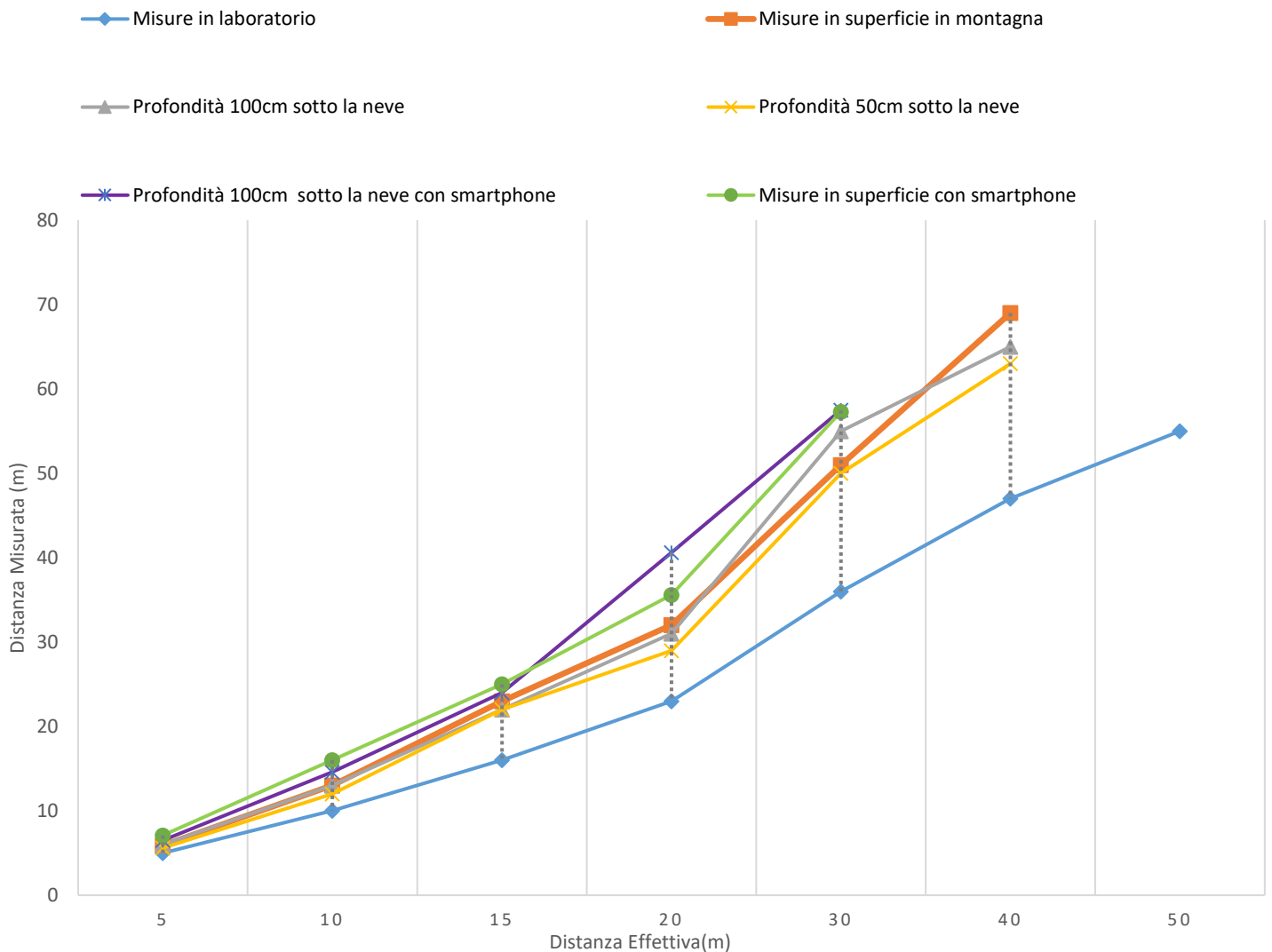


Grafico 2.1, si prenda come riferimento le misure in superficie (linea tratteggiata arancione ---) che rappresentano lo scostamento dei valori 'ideali' rispetto a condizioni avverse

Dal *grafico 2.1* si può osservare che il range max/min (cioè la differenza tra valore massimo e minimo) aumenta con la distanza, e ciò rappresenta una minor precisione e quindi uno scostamento dal valore ideale progressivamente maggiore. I valori 'Misure in laboratorio' (■---■) sono da considerarsi 'ideali', e quindi non realizzabili nell'ambiente in cui si opera.

Nel grafico e tabelle, non sono presenti tutti i valori perché raggiunta una certa distanza si è avuta la perdita completa del segnale.

Si può inoltre osservare, che ad una profondità di 50 cm in contatto con uno smartphone, il segnale dell'ARTVA in ricezione non subisce interferenze significative e si discosta poco dal valore di riferimento.

2.5.3 Drone

Prima di procedere con la descrizione delle analisi eseguite sul drone è necessario descriverne la sua struttura e le componenti che lo compongono [13].

Come scritto nella sez. 1.4, attualmente si utilizza un drone quadricottero Tarot 650 equipaggiato con:

- Pixhawk The Cube & Here 2 Combo, un Sistema sviluppato per il volo autonomo di droni (*figura 2.9a*);
- 4 motori Tarot 4114 (320kV);
- Eliche Tarot 1555;
- 4 ESC o Electronic Speed Controller Hobbywing Xrotor Pro 40a, unità adibita al collegamento del singolo motore con il controllore di volo permettendone la regolazione della velocità (*figura 2.9b*);
- FrSky X8R 8-16, ricevitore per telemetria;
- Batteria Turnigy graphene 5000mah 6s 45c;
- HKPilot 500mW ricetrasmittitore radio telemetria, per collegare ad un controllore di volo una USB (si fornisce quindi un collegamento diretto con computer e schede dati/memorie esterne);



Figura 2.9a



Figura 2.9b

2.5.2 Test di interferenze prodotte dal drone

Successivamente ai test condotti tra ARTVA è stato necessario stabilire e individuare le componenti del drone che producono interferenze. I dati sono stati raccolti in laboratorio presso l'Università degli studi di Padova.

Si sono scollegate tutte le parti del drone non necessarie per eseguire i test (sez. 2.5.1) che potevano costituire una sorgente di disturbi, ad eccezione di alcune componenti saldate al telaio (carrelli retrattili elettrici) *figura 2.10*.

Sono stati condotti rilievi inizialmente con il drone spento, così da individuare la qualità del segnale minimizzando le interferenze.



Si è proceduto poi ad effettuare misure con il drone in funzione, ponendo la ricetrasmittente ARTVA Pieps in diversi punti del corpo centrale del Tarot, individuando la posizione in cui il segnale è meno disturbato. Per la trasmissione si è usato anche in questi test il Barrivox S®, a 7.77mt di distanza dal ricevitore (spazio massimo consentito nel laboratorio).

Lo scopo è quantificare i disturbi sia in funzione della distanza del ricevente, sia in base alla potenza fornita ai motori.

Distanza dal corpo centrale drone	Tutto scollegato	Throttle 50%	Throttle 50% con alluminio	
0 cm	4.4	4.4	12	Davanti al drone
22 cm	4.4	Perso	4.3	
17 cm	4.3	4.4	4.3	
13 cm	5.6	Perso	4.4	Sotto al drone
12cm	5.9	-	11	
0 cm ESC	4.5	Perso	12	
9 cm ESC	4.3	5.2	4.4	
16 cm	Perso	-	4.4	Sopra al drone
0 cm	Perso	-	4.4	

Tabella 2.3, misure del segnale con e senza schermatura

Il valore reale captato dall'ARTVA senza il drone in prossimità è 4.4, ed è quindi da considerarsi di riferimento.

Si è osservato (*tabella 2.3*) che a creare disturbo, oltre ai motori stessi, sono la Pixhawk e i cavi che alimentano l'ESC (tali cavi passano all'interno dei bracci del drone). Gli stessi test sono stati condotti anche con motori spenti con lo stesso esito.

Azionando i motori con un *throttle* del 50% si nota come essi creino ulteriori interferenze (ancora più significative).

Ponendo frontalmente l'ARTVA e azionando i motori posteriori, le misure non sono alterate e ciò permette di concludere che i disturbi percepiti sono minimi, ma il mancato utilizzo dei motori frontali è una condizione non praticabile. È necessario quindi trovare un modo per schermare il ricevitore dagli ESC e dai motori (in particolare quelli anteriori).

Si può concludere che attualmente il posizionamento più efficiente dell'antenna, in linea al bilanciamento di peso del drone è sopra o sotto il corpo centrale, a una distanza di 9cm da ogni singolo ESC.

Si è voluto effettuare dei test (*tabella 2.3*) anche sulla schermatura di vari disturbi, utilizzando lastre di alluminio dello spessore di circa 1 mm e fogli di rame di spessore pari a 2 mm.

Si è osservato che la capacità di schermare le interferenze sia uguale per entrambi i metalli, e perciò la scelta è ricaduta su quello con peso specifico minore, ovvero l'alluminio ($2,7 \text{ g/cm}^3$ contro $8,96 \text{ g/cm}^3$ del rame). Importante il posizionamento della lastra schermante, che se posta in prossimità o a contatto con il corpo centrale, rende il segnale inutilizzabile (rilevazione di 12m, con valore reale 4,4m). Dalle rilevazioni, sarà necessario avere una distanza di 9 cm, che verrà affiancata ad ulteriori operazioni di schermatura delle altre componenti (sorgenti di disturbi) valutando anche l'impiego di componenti prodotte con stampante 3D [11][12].

Capitolo 3

Il circuito di filtrazione e amplificazione

3.1 Analisi del circuito

Il circuito sviluppato prevede l'utilizzo di amplificatori e circuiti integrati che necessitano di un'alimentazione duale stabile. Pertanto, risulta necessario progettare un sistema di alimentazione specifico a partire dalle batterie fornite nel kit Tarot (Turnigy graphene 5000mah 6s 45c).

Si è scelto di non utilizzare ulteriori batterie esterne principalmente per due motivi:

- La potenza dissipata del circuito rispetto al drone è irrilevante, un solo motore consuma 420W ma utilizzandone quattro il totale è di 1680W contro i 5W dissipati dal circuito (sovrastima); il consumo di energia è quindi irrisorio.
- Un'alimentazione esterna aumenterebbe il carico sostenuto dal drone e ridurrebbe lo spazio utilizzabile nel corpo centrale (la fase di ottimizzazione prevede l'utilizzo di un drone piccolo e versatile, sez.1.4). La durata della batteria e quindi del volo verrebbe ridotta andando a penalizzare la fase di ricerca (il tempo effettivo di utilizzo massimo è di 30 minuti, dato già molto esiguo).

3.1.1 Circuito di alimentazione $\pm 12V$

Come si vedrà successivamente (sez. 3.2.1 e sez. 3.2.3) gli AD8428 e LT1028 sono amplificatori che necessitano di un'alimentazione duale dal valore compreso tra $\pm 4,5V$ e $\pm 16V$ [14][15].

Le batterie utilizzate dal drone sono di 24V, ciò permette di sviluppare un circuito (figura 3.1) che divide la tensione in $\pm 12V$ e genera un potenziale di riferimento (GND) stabile.

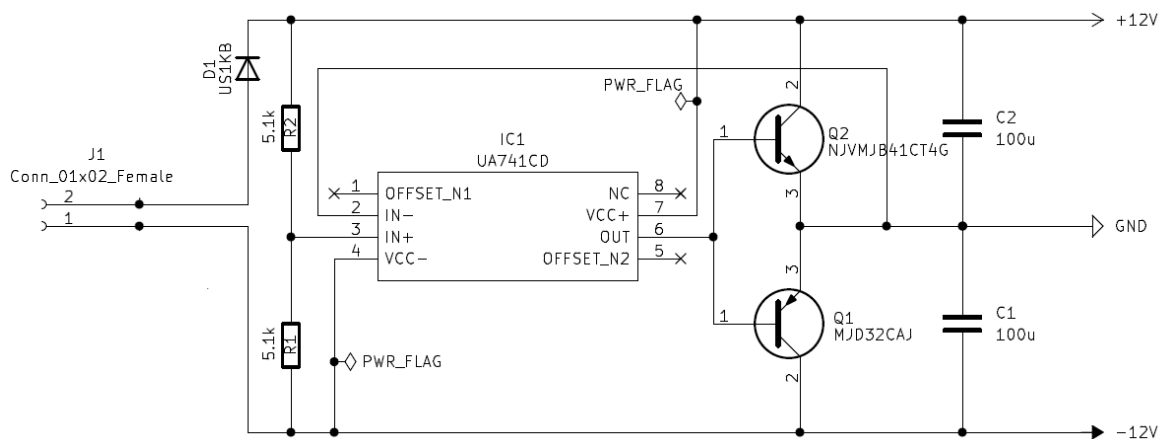


Figura 3.1
Circuito 'Dual Split Rail' impiegato per la doppia alimentazione degli amplificatori

Il circuito in figura è costituito principalmente da un regolatore IC1 che controlla i due transistor Q1 e Q2 permettendo al ground di essere una tensione regolata e mantenere la d.d.p fissa tra i terminali + e -. La funzione di ‘regolatore’ è svolta da un UA741, un AO di uso generale ad alto guadagno, compensato in frequenza e realizzato con tecnologia di costruzione bipolare.

L’assenza di latch-up e l’ampio intervallo di tensioni (di modo comune e di modo differenziale) rendono l’amplificatore ideale per la sua applicazione nel circuito in *figura 3.1*, come inseguitore (o buffer) di tensione. Altri parametri fondamentali sono il basso consumo di potenza e la protezione da possibili cortocircuiti.

Esistono diverse tipologie, ma si è scelto l’ UA741I più adatto alle basse temperature (-40°C/85°C) rispetto al UA741C che opera nel range 0°C/70°C (*figura 3.2*)

I suoi principali parametri sono [9][16]:

- Amplificazione di tensione $A_v^{\max} = 200\ 000$
(il circuito ha però un guadagno unitario)
- Resistenza di ingresso $R_i = 2M\Omega$
- Tensione di offset di ingresso $V_{IO} = 2mV$
- CMRR = 90dB
- Resistenza di uscita $R_u = 75\Omega$
- Corrente di polarizzazione di ingresso $I_{IB} = 80nA$



Figura 3.3
Connettore Amass XT30

Il circuito viene alimentato dalle batterie Turnigy, utilizzando un connettore di tipo DC ed è un Amass XT30 (*figura 3.3*) con due porte maschio e una di tipo femmina per permettere il collegamento simultaneo al circuito e al drone. L’alimentazione dell’AO è $\pm 12V$ ed è ottenuta grazie ai due resistori R1 e R2 da $5,1k\Omega$ collegati in parallelo al morsetto V_p (o $IN+$ utilizzando la nomenclatura del datasheet). La tolleranza delle resistenze è dell’1%.

Si è ritenuto necessario utilizzare un diodo raddrizzatore US1KB-13-F (D1), proteggendo il circuito da inversioni di polarità dell’alimentazione.

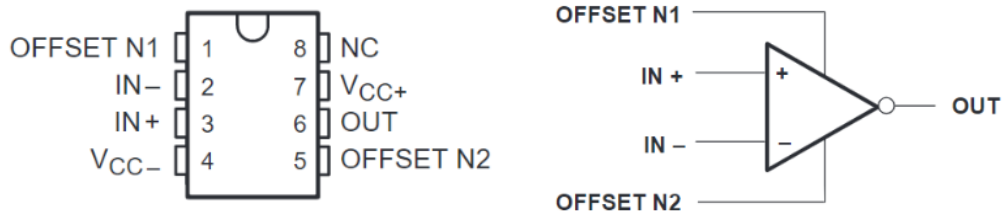


Figura 3.2
 A sinistra il componente smd
 A destra lo schema semplificato
 NC: Nessuna connessione interna
 Offset N#: Assenti nel circuito aggiustamenti di tensione di offset

L'uscita del regolatore comunica con la base dei due transistor Q1 e Q2 controllando in parte il loro punto di funzionamento; se i due carichi in uscita richiedono correnti uguali, il regolatore non cambia (i transistor rimangono invariati), se invece sono diverse, Q1 e Q2 per compensare la d.d.p. condurranno corrente extra.

I transistor utilizzati sono MJD32CA e MJD31CA, di tipo BJT rispettivamente PNP (Q1) e NPN (Q2), dotati di velocità di commutazione elevata e bassa tensione di saturazione emettitore-collettore. Sono utilizzati per numerose applicazioni tra cui regolazione di corrente, switch di carichi, e regolatori di tensione lineari. Un'alternativa ai due transistor sono NJVMJB41C (NPN) e NJVMJB42C (PNP). Nella prima versione di circuito tht testata su breadboard, si sono usate le versioni a foro passante TIP41C e TIP42C (figura 3.4)[17][18].

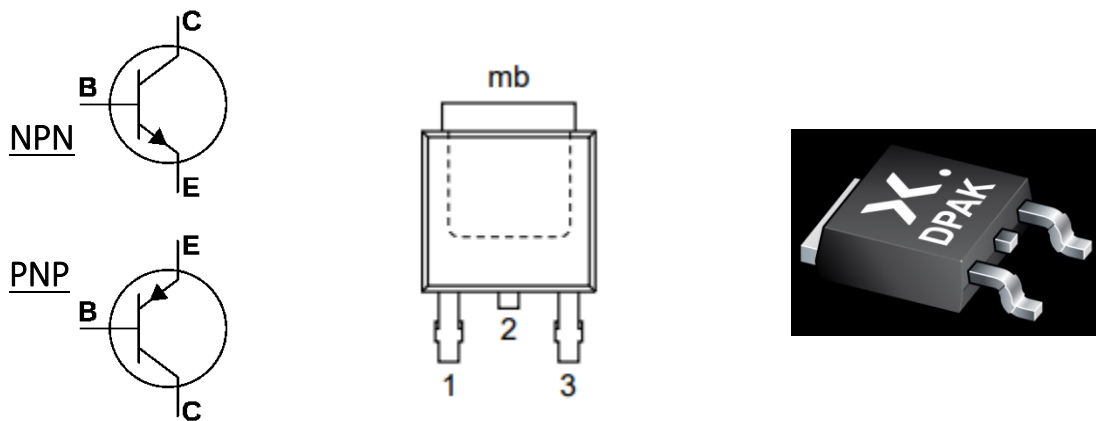


Figura 3.4
 A sinistra lo schema semplificato
 Centrale il componente smd
 A destra il componente 3D

La parte finale del circuito, è invece costituita da due condensatori ceramici C1 e C2 di 100 μ F con tolleranza 1%, inseriti tra i terminali dell'alimentazione dell'operazionale e la massa.

Hanno la funzione di cortocircuitare a massa i disturbi ed il rumore che possono essere presenti sulle linee di alimentazione ed entrando nell'amplificatore possono causare errori [9].

3.1.2 Circuito di alimentazione +5V

Nella sez. 3.2.2 si approfondirà l'utilizzo del circuito integrato HMC245A, che necessita di una singola alimentazione di +5V per il corretto funzionamento [19].

Si è utilizzato un LM7805 (IC2 in figura 3.5) come regolatore di tensione per ottenere il voltaggio richiesto a partire dai 24V della batteria Turnigy.

Questo componente è un integrato a 3 pin in grado di modificare un segnale di tensione in ingresso (compreso tra 7 e 20V) e fornirne uno diverso in uscita (5V) e corrente massima di 1A, con determinate caratteristiche richieste per il corretto funzionamento del circuito a cui è alimentato. Perché ciò sia possibile, al suo interno il regolatore di tensione ha un circuito con una serie di resistori e transistor bipolari [20][21].

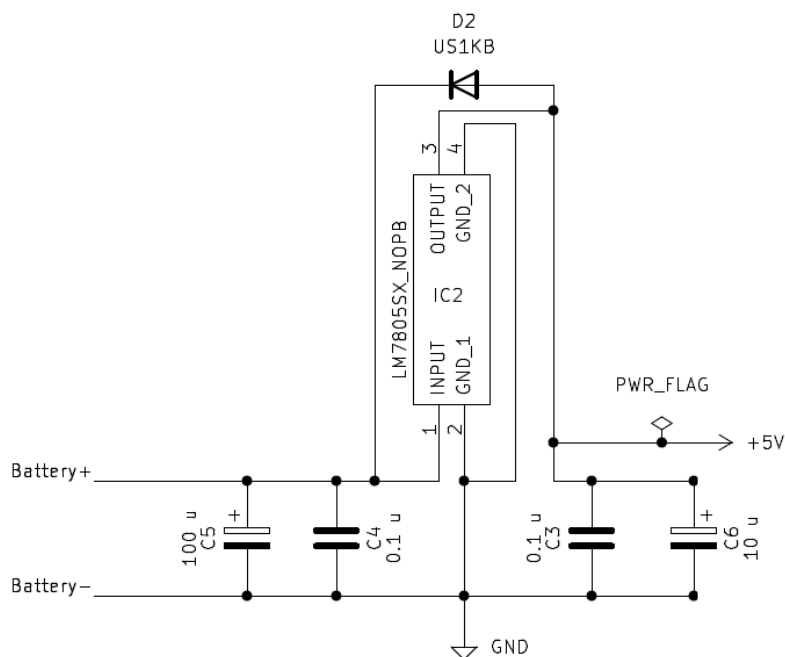


Figura 3.5
Circuito di regolazione di tensione
con 12V in ingresso e 5V in uscita

Il circuito in *figura 3.5* è molto semplice:

- Il condensatore C5 è di tipo elettrolitico in alluminio, ha un valore minimo di 100 μF ed assume il valore di 100 μF per ogni Ampere in uscita. Essendo di 6mA la corrente assorbita dall'HMC245A, si è utilizzato un condensatore di valore minimo, con tolleranza 1%.
- Il condensatore C6 è anch'esso di tipo elettrolitico in alluminio il cui valore deve essere compreso tra $\frac{C5}{3}$ e $\frac{C5}{10}$, si è scelto quindi il valore di 10 μF ($\frac{C5}{10}$).

Questi due condensatori elettrolitici svolgono la funzione di bypass, stabilizzando il controllo della tensione di uscita (*ripple smoothing*). I segnali in frequenza vengono cortocircuitati e se ne ottengono di più stabili con un numero inferiore di ondulazioni, filtrando e bypassando parte del rumore.

- I condensatori C3 e C4 sono di tipo ceramico (multistrato) con valore fisso di 0.1 μF , e devono essere posizionati il più vicino possibile (fisicamente) ai pin di alimentazione dell'integrato. Sono necessari qualora si verificano picchi di assorbimento di corrente con una $\frac{dV}{dt}$ troppo elevata per i condensatori elettrolitici. Utilizzando un condensatore ceramico in serie a quello di bypass, è possibile assorbire tale picco istantaneo.

Molto importante è disporre i condensatori elettrolitici con il giusto orientamento, altrimenti la polarità inversa li danneggia irreversibilmente. La dimensione del condensatore in ingresso è proporzionale alla caduta di tensione che se errato, può portare a disturbi aggiuntivi.

Infine si è utilizzato un diodo di protezione US1KB-13-F (D2) per le stesse motivazioni che hanno portato all'utilizzo del diodo D1. In questo caso è però una sovrastima, dovuta alla presenza del condensatore C6 che immagazzinando energia dovrebbe scaricarsi per primo, permettendo alla tensione di non cambiare istantaneamente e proteggendo il circuito da inversioni di polarità [21][22].

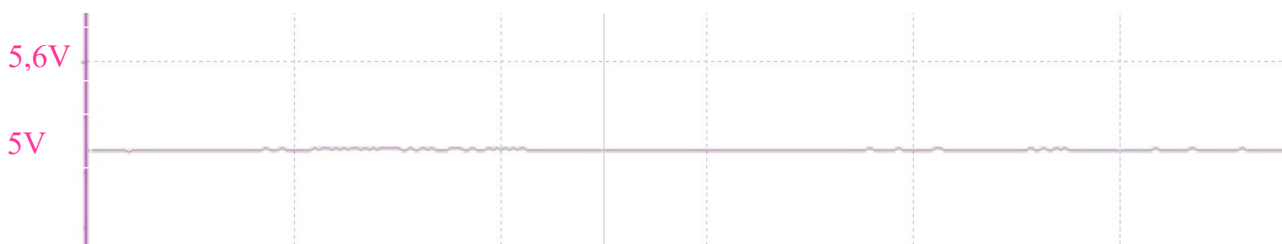


Figura 3.6
Test del circuito su una
millefori con un oscilloscopio

Testando il circuito su una millefori con un oscilloscopio (*figura 3.6*) si ottiene una tensione di uscita stabile; si precisa che il test è stato condotto senza nessun carico applicato. La tensione rilevata è di 4,965V con un intervallo di picco-picco di 187mV. Utilizzando come carico un Arduino non si è osservata nessuna variazione dell'andamento della tensione [23].

Nelle versioni ottimizzate di questo circuito, si utilizzerà un LM78L05 più adatto a gestire correnti inferiori (massimo 150mA in uscita) a 5V.

3.2 Premessa sul sistema di amplificazione e filtrazione del segnale

Come si è osservato nella sez. 2.3, l'antenna impiegata nella ricezione del segnale, ha potenza e selettività molto basse e ciò compromette la qualità del segnale. È quindi necessario eliminare da subito le interferenze riducendo la larghezza di banda, strettamente legata al fattore di merito Q (0,71) individuato nella sez. 2.3 e utilizzare un'architettura differenziale (sez. 3.2.1).

In un circuito risonante, si può definire come la gamma di frequenze entro la quale la tensione presente ai capi del condensatore variabile di sintonia (ovvero all'estremità della bobina) non cade al di sotto del 70,7% del valore corrispondente alle condizioni di risonanza (*figura 3.7*). Il valore rappresenta quindi l'intervallo di frequenze che il segnale contiene e/o che il circuito di ricezione è in grado di trattare (caso attuale) [9].

È determinata dal coefficiente Q del circuito (*equazione 3.2*).

$$Q = \frac{F_r}{F_H - F_L} \quad (3.2)$$

$$B = \text{Larghezza di banda a 3dB} = \frac{F_r}{Q} \quad (3.3)$$

Si definisce:

- F_L la frequenza inferiore, alla quale il valore della tensione si riduce del 70,7% del valore di risonanza;
- F_H la frequenza superiore, alla quale il valore della tensione si riduce del 70,7% del valore di risonanza;
- $F_H - F_S$ la larghezza di banda,
- F_r la frequenza di risonanza

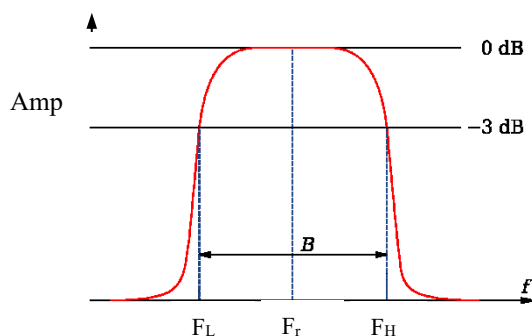


Figura 3.7

Essendo F_r e Q noti (rispettivamente 457kHz e 0,71) dall'equazione 3.2 si ottiene il valore della larghezza di banda, cioè 643,366 kHz.

Essendo un intervallo, il valore trovato rappresenta l'ampiezza totale le cui bande inferiori e superiori sono di ± 321.83 kHz. Ciò permette di concludere che lo spettro delle frequenze captate dall'antenna va da 135 kHz a 778 kHz [9]. Per avere una riduzione della larghezza di banda, non potendo variare la frequenza è necessario aumentare il fattore di merito Q , che a sua volta è in funzione del valore di induttanza (direttamente proporzionale) e resistenza ohmica (inversamente proporzionale).

Si sono valutati attentamente i vari approcci e si è optato per lo sviluppo di un circuito in grado di amplificare e filtrare il segnale.

L'alternativa più efficace consiste nell'utilizzo del filo di Litz con avvolgimento a nido di ape che permette di diminuire il parametro della resistenza e avere un minor numero di correnti parassite ma si è scelto di valutarne l'utilizzo in fase di ottimizzazione, essendo comunque necessario il circuito già sviluppato per le attuali condizioni di lavoro dell'antenna.

Lo schema a blocchi del sistema di elaborazione del segnale è rappresentato di seguito (figura 3.8) [11][24].

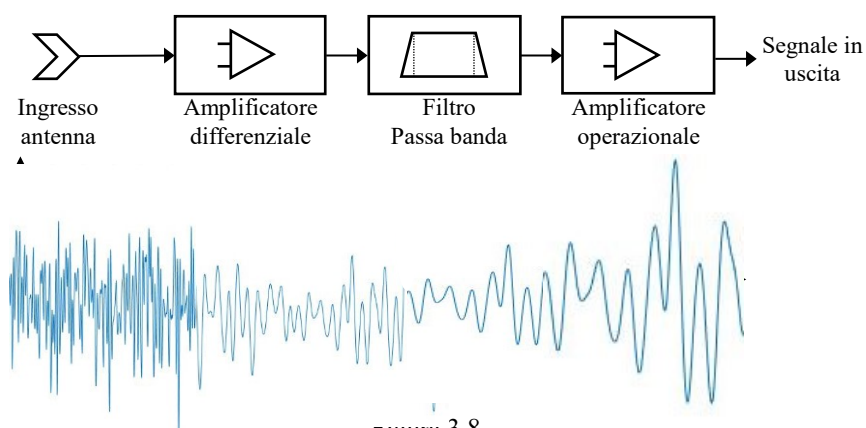


Figura 3.8
Schema di elaborazione del segnale simulato su MATLAB

3.2.1 Amplificatore differenziale da strumentazione

Il primo componente a cui il segnale è sottoposto, è l'amplificatore da strumentazione AD8428 (U2, U3 e U4) uno per ciascuna antenna (figura 3.9). È un componente a basso rumore sviluppato per misurare con estrema precisione segnali piccoli e veloci ed ha tra le caratteristiche principali un elevato guadagno. I segnali indesiderati non vengono amplificati grazie all'alto rapporto di reiezione di modo comune (CMRR massimo di 140dB) e i pin sono progettati per evitare alle capacità parassita di degradarne il valore ad alte frequenze.

L'AD8428 ha un'architettura differenziale progettata per un'elevata larghezza di banda (3,5MHz) ad alto guadagno (2000); il primo stadio (preamplificatore) è di 200, seguito da uno differenziale di 10 [14].

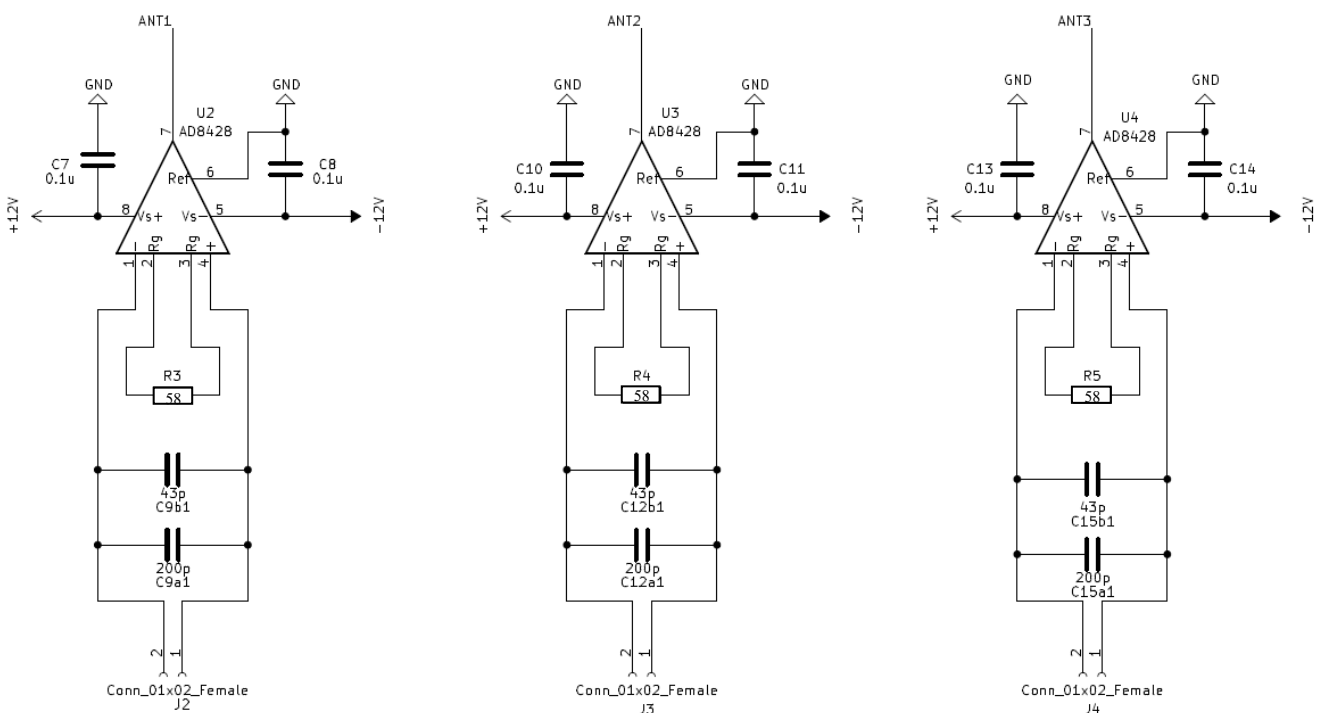


Figura 3.9

I terminali del componente sono otto (figura 3.10), e la configurazione dei relativi pin è [14]:

- Due terminali di input +IN e -IN, sono l'ingresso del segnale ricevuto dall'antenna;
- Due terminali di alimentazione +Vs e -Vs ($\pm 12V$ forniti dal circuito in sez. 3.1.1);
- Due terminali di input Rg, che ne determinano il guadagno;
- Un terminale di output OUT;
- Un terminale di tensione di riferimento REF (messo a massa);

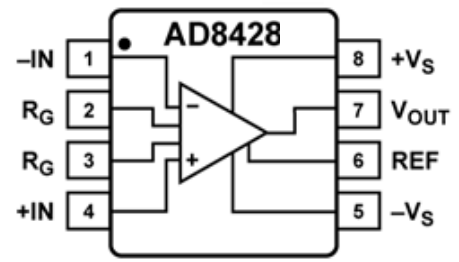
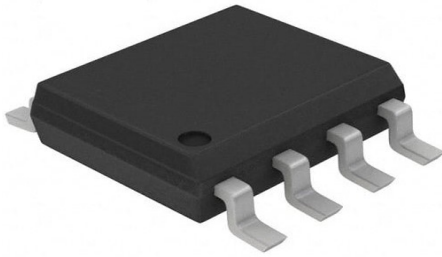


Figura 3.10
 A sinistra il componenten3D
 A destra la rappresentazione
 schematica e non in scala dell'AO
 AD8428

Utilizzando un'architettura differenziale i valori di particolare interesse sono i guadagni differenziali e di modo comune da cui si può ricavare il CMRR:

Guadagno di modo differenziale:

Per individuare questo valore, è necessario applicare agli ingressi un segnale differenziale la cui media è zero. Si ottiene utilizzando in ingresso delle sinusoidi di uguale ampiezza ma con fase diversa di 180°.

Guadagno di modo comune:

Il suo valore si ottiene applicando lo stesso segnale ad entrambi gli ingressi v_+ e v_- .

Il motivo di tali scelte è spiegato nella formula della tensione di uscita di un amplificatore differenziale reale (equazione 3.4) [9].

$$V_{out} = A_d(v_+ - v_-) + A_c \left(\frac{v_+ + v_-}{2} \right) = A_d v_{id} + A_c v_{ic} \quad (3.4)$$

Con:

- A_d = Guadagno di modo differenziale;
- A_c = Guadagno di modo comune;
- $v_+ = +IN$;
- $v_- = -IN$;
- v_{id} = Tensione di ingresso di modo differenziale;
- v_{ic} = Tensione di ingresso di modo comune;

I valori individuati sono stati misurati ad una frequenza di 457kHz:

Guadagno di modo differenziale totale: $A_d = 20.99\text{dB}$

Guadagno di modo comune: $A_c = -66.12\text{dB}$

Con questi due dati, è possibile ricavare il rapporto di reiezione comune (CMRR) che rappresenta la capacità dell'amplificatore di respingere il segnale che si presenta uguale ai due ingressi. Il rumore o un disturbo è un segnale esterno che appare come un offset su entrambi gli input, e si può pertanto rappresentare come un segnale di tensione di modo comune.

Dall'equazione 3.5 si può osservare la proporzionalità inversa con il guadagno di modo comune, ciò indica che un elevato valore di CMRR rappresenterà la tendenza ad attenuare i disturbi sulle linee di trasmissione; idealmente si considera sempre pari a ∞ [25][26].

$$\text{CMRR (dB)} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} \quad (3.5)$$

$$\text{CMRR} = A_d - A_c \quad (3.6)$$

Avendo già espresso i guadagni in dB, il rapporto corrisponde a una differenza logaritmica (equazione 3.6) da cui si individua il valore di 87.11 dB. È necessario specificare, che il CMRR massimo consentito alla frequenza di 457kHz è di circa 108 dB (figura 3.11) [14].

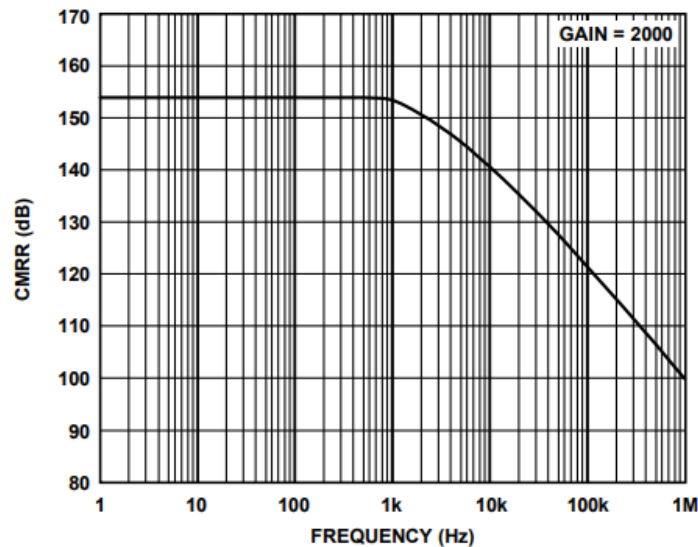


Figura 3.11
Tabella presente nel datasheet dell'AD8428.

La funzione di trasferimento della tensione in output è [14]:

$$V_{\text{out}} = G(V_{\text{IN}+} - V_{\text{IN}-}) + V_{\text{REF}} \quad (3.7)$$

$$G = \frac{2000 R_G}{R_G + 6000} \quad (3.8)$$

Con $R_G = 58\Omega$ si ottiene un guadagno $G = 19.15$ ovvero 25.64 dB (le simulazioni condotte su LTspice hanno determinato il guadagno per la risposta in frequenza finale del circuito).

Si è posto il morsetto REF a massa, per rendere nulla la V_{REF} .

Analizzando ora il circuito in figura 3.9, si individuano i seguenti componenti:

- Due condensatori ceramici (C9a e C9b) in parallelo rispettivamente da 200pF e da 43pF, il cui valore totale è di 243pF. I calcoli sono stati descritti nella sez. 2.3 e il componente permette di completare il circuito LC in parallelo, definendo la frequenza di risonanza del circuito;
- Una resistenza R3 di 58Ω che determina il guadagno dell'amplificatore;
- Due Condensatori ceramici (C10 e C11) di 0,1μF connessi tra i terminali delle alimentazioni e la massa con piste molto corte. Hanno la funzione di cortocircuitare a massa i disturbi e il rumore presenti sulle linee di alimentazione e che entrando nell'amplificatore possono causare errori.

Tutti i componenti sono stati scelti con la tolleranza minore possibile (0.1%).

In questa parte di circuito non si è utilizzato nessun connettore specifico, si è deciso di saldare le due estremità dei fili di rame che avvolgono l'antenna su delle piazzole di rame nella PCB in prossimità agli AD8428.

3.2.2 Commutazione e filtrazione

Il circuito visto nella sezione precedente, è applicato distintamente a ciascuna delle tre antenne che producono quindi tre output differenti (ANT1, ANT2, ANT3). Per elaborare questi tre segnali, sarebbero necessari tre differenti stadi di filtrazione e amplificazione che impiegherebbero spazio, risorse economiche ma soprattutto un incremento del rumore generato dall'intero circuito. Si è trovata quindi un'alternativa che prevede l'utilizzo di un commutatore HMC245A (IC3 in figura 3.12) in grado di selezionare uno dei tre segnali e deviarlo al circuito di filtrazione.

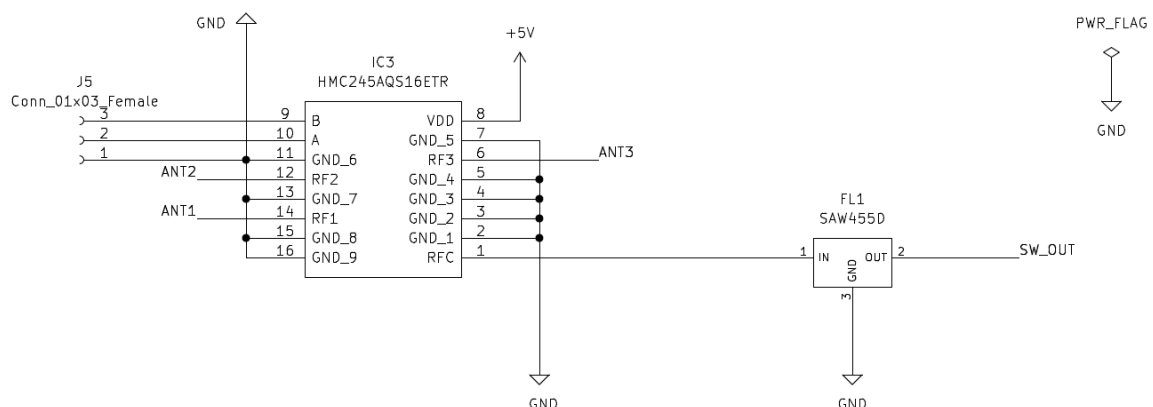


Figura 3.12
Circuito deviatore e filtro Saw455D

Questo circuito integrato è dotato di 16pin con le seguenti funzioni:

- Tre RFx, ricevono in ingresso rispettivamente i tre segnali ANTx;
- Un RFC costituisce l'uscita del segnale selezionato;
- Nove GND da collegare alla massa del segnale per massimizzare l'isolamento;
- Un Vdd di alimentazione a +5V fornita dall'LM7805 descritto nella sez. 3.1.2;
- Due pin A e B digitali che controllano la commutazione (si veda la tabella delle tensioni di controllo* e tabella delle verità **);

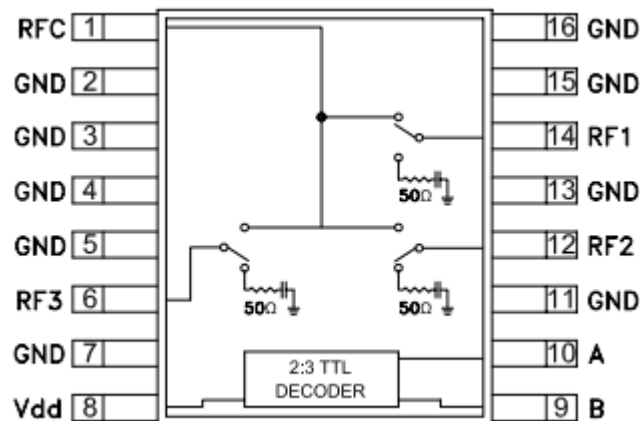


Figura 3.13
Rappresentazione schematica
deviatore IC3

* Tabella tensioni di controllo (+5V e da 2,2 a 6,0 mA):

Stato:	Low	High
Condizioni tensione:	da 0 a +0.8V	da +2.0 a +5V

** Tabella verità (Low = L, High = H):

Input A:	L	H	L	H
Input B:	L	L	H	H
RF COM in:	RF1	RF2	RF3	Off

L'ingresso dei due pin digitali A e B è in comunicazione con un Raspberry PI 3-B (v. 1.2) che per mezzo di un codice scritto con Python permette in modo ciclico di analizzare ciascun segnale, fornendo i valori di tensione necessari per commutare lo stato logico in Low/High.

Il connettore J5 utilizzato è un JST orizzontale.

Il segnale che esce in output è poi dato in ingresso a un particolare filtro passa-banda centrato a 455kHz appartenente alla tipologia SAW (acronimo di *surface acoustic wave*), un tipo di filtri passivi utilizzati nelle applicazioni a radiofrequenza e ha come proprietà principale la trasduzione, cioè la capacità di convertire l'energia elettrica in meccanica o acustica mediante un materiale piezoelettrico e la riduzione della potenza del rumore in ingresso senza influire sul guadagno complessivo del circuito (*figura 3.14*) [27][28].

Le caratteristiche principali sono:

- *Insertion loss* di 6dB che è possibile compensare con un amplificatore;
- *Stop-band* con attenuazione massima;
- *Ripple* di 3dB;
- Bassa perdita di trasmissione;
- Buone prestazioni anti-interferenza elettromagnetica EMI;

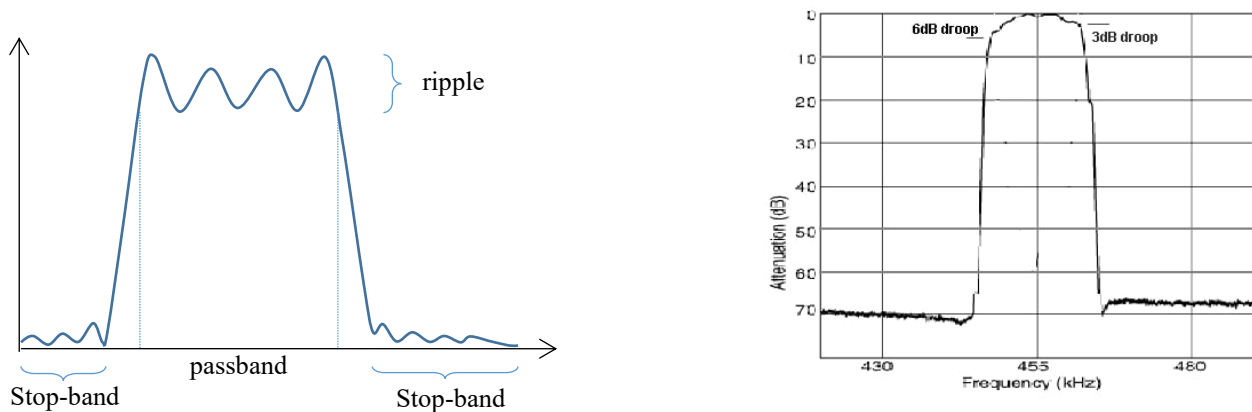


Figura 3.14

A sinistra una rappresentazione schematizzata del segnale
 A destra la risposta in frequenza del filtro SAW
 Si può osservare la larghezza di banda rispettivamente
 a 6dB e 40dB

Per *insertion loss* si intende la perdita di potenza di un segnale dovuta all'inserimento di un filtro.

Per *stop-band* si intende una banda di frequenze attraverso la quale il filtro non consente o attenua il passaggio di segnali.

La larghezza di banda a 40dB è di ± 9 kHz, e a 6dB è di ± 3 kHz come si può osservare in *figura 3.14*.

3.2.3 Amplificatore operazionale e riduzione del rumore

Il circuito progettato finora permette di ottenere un segnale filtrato alla frequenza di 457kHz (l'intervallo di frequenze comprese si è visto però essere sensibilmente più ampio, ma comunque centrato a 455kHz) ed è quindi possibile procedere con la sua amplificazione, per aumentarne la potenza.

Prima di descrivere lo sviluppo e le scelte conseguite, è necessario evidenziare la correlazione tra il rumore e il numero di componenti presenti nel circuito di tipo direttamente proporzionale; inoltre i segnali trattati sono di ampiezza ridotta (alcune decine di millivolt) e una configurazione standard dell'amplificatore ha lo svantaggio di moltiplicare il rumore di ingresso, il rumore aggiunto dall'amplificatore stesso e il segnale iniziale. In questo mondo non si ottiene alcun miglioramento del rapporto segnale-rumore (SNR), ma in tal caso un peggioramento.

$$SNR = \frac{S_{OUT}}{N_{OUT}} = \frac{S_{IN}G}{N_{IN} + N_{amp}} \quad (3.9)$$

Si è però utilizzato un filtro SAW che avendo ridotto notevolmente il rumore esterno permette al momento di assumerlo trascurabile; l'equazione 3.9 viene quindi riscritta:

$$SNR = \frac{S_{IN}G}{N_{amp}} \quad (3.10)$$

Essendo due le sorgenti di rumore non correlate è possibile amplificarne il valore in modo differente, utilizzando due amplificatori in parallelo che aumentano la potenza del segnale di un fattore 2 e il rumore dell'amplificatore di un fattore $\sqrt{2}$ (non essendo un'interferenza correlata) [15][29].

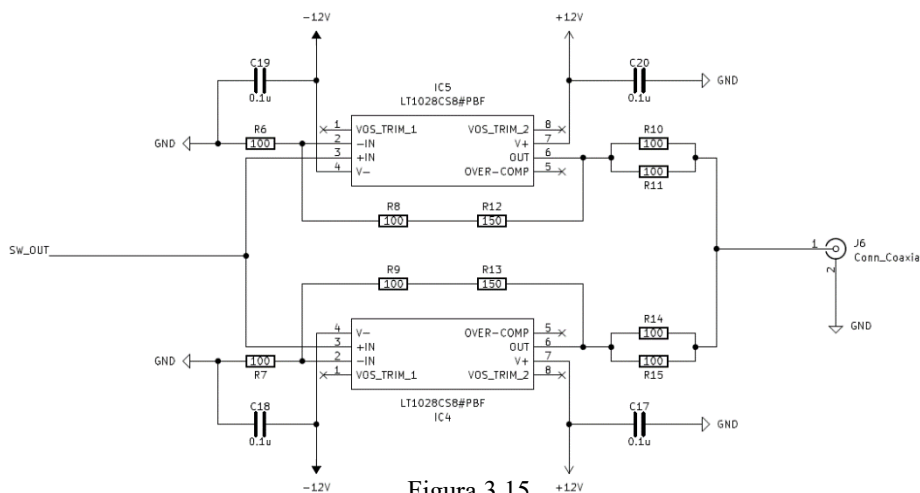


Figura 3.15
Schema di amplificazione LT1028

Gli AO utilizzati per ottenere questo miglioramento sono LT1028 (IC4 e IC5 in *figura 3.15*) a bassa distorsione ed alto rendimento, la cui proprietà principale è la densità di rumore ultra bassa di $0,85\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Questa disposizione ha consentito di ottenere una minor densità di rumore di tensione (da $867,66\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ iniziali, a $617,00\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$), ottenendo un conseguente miglioramento del SNR da $29,20\text{dB}$ a $32,16\text{ dB}$ alla frequenza di 457kHz (dati ottenuti mediante simulazione LTspice XVII e verificati con SDR).

Il circuito integrato utilizzato è dotato di otto pin (*figura 3.16*) che svolgono le seguenti funzioni [15]:

- Due pin V_{\pm} di alimentazione duale del valore di $\pm 12\text{V}$;
- Un pin +IN di ingresso che riceve il segnale filtrato dal componente SAW;
- Un pin -IN connesso in retroazione all'uscita del AO (pin OUT);
- Un pin OUT da cui esce il segnale amplificato ($G=18,99\text{ dB}$);
- Due pin V_{OS} che consentono di regolare le tensioni di offset;
- Un pin OVER-COMP a cui è possibile collegare un condensatore (generalmente di 10 o 100pF) che riduce la larghezza di banda del rumore;

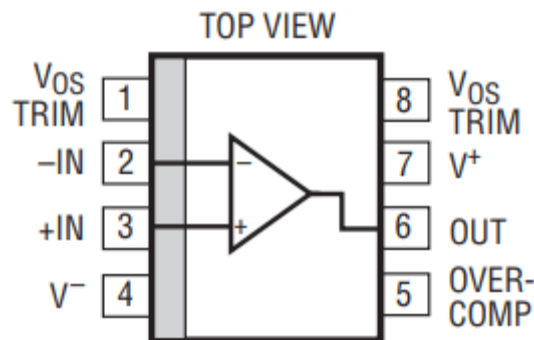


Figura 3.16
Rappresentazione schematica e non in scala
del circuito integrato LT1028

Tra i vari componenti utilizzati, si specifica quanto segue:

- Le resistenze sono poste per evitare cortocircuiti con l'integrato e le alimentazioni, hanno un valore minimo con tolleranza dell'1%, la disposizione in serie e in parallelo è dovuta a una maggior reperibilità nei siti in cui è stato eseguito l'ordine;
- I condensatori da $0.1\mu\text{F}$ hanno la funzione di cortocircuitare a massa i disturbi e il rumore presenti sulle linee di alimentazione (già impiegati nelle precedenti sezioni di circuito);
- Il connettore di uscita del segnale elaborato di tipo coassiale (J6);

L'utilizzo di questo connettore è necessario per trasferire un segnale in alta frequenza sotto forma di energia elettrica tra due dispositivi, è costituito da una maglia metallica cilindrica che scherma un filo conduttore posto al centro, permettendo al segnale di non subire distorsioni o interferenze [9].

3.3 Sviluppo circuito stampato

Terminata la progettazione dei componenti si è proceduto con lo sviluppo del relativo circuito stampato (*Printed Circuit Board* o PCB) sviluppato con il software KiCad 6.0.

Il primo parametro di costruzione sono le dimensioni che la scheda deve avere, che, poggiando su un *case* (figura 3.17) di dimensioni 197,99mm x 190,01mm si è stimata essere entro e non oltre i 100mm di lato (anche i moduli Raspberry Pi e PixHawk poggiano sul corpo centrale).

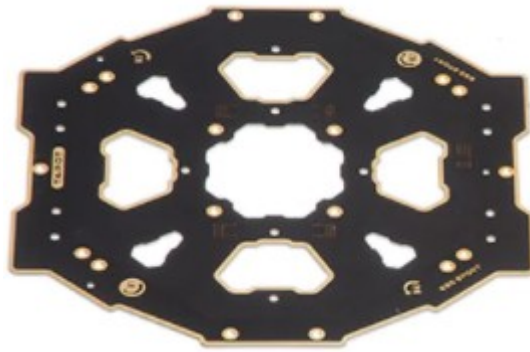


Figura 3.17
Struttura su cui poggia la PCB

Si è deciso di sviluppare la scheda con componenti di tipo SMD/SMT per ridurre ingombro e peso finale, a discapito della saldatura che invece richiede più precisione e attenzione.

Inoltre essendo un circuito per RF sono da reputarsi poco affidabili i test su piastra *Through Hole* a causa degli elevati disturbi e l'alta sensibilità dei segnali elaborati.

Un'altra considerazione fatta è stata la finitura della PCB, optando inizialmente per Enig o HASL (senza piombo), anche se in fase di ottimizzazione si sta valutando di utilizzare una rifinitura di argento per immersione che ha caratteristiche migliori, ma ha come svantaggio un annerimento estetico superficiale. Ha un periodo di stoccaggio di 6-8mesi.

Enig è invece sconsigliato perché non è rilavorabile ed ha una perdita di segnale maggiore, mentre l'HASL non è opportuno per il montaggio SMD [30][31].

Infine l'ultimo aspetto di progettazione sono i *layer* che compongono la scheda.

Nella versione attuale non ancora ottimizzata si è deciso di utilizzare due *layer* così a seguire (figura 3.18):

- Piste del segnale nella parte destra (molto delicate e sensibili) e quelle di alimentazione nella parte sinistra
- Piano di massa, così da poter schermare le interferenze tra il *layer* superiore e il corpo centrale del drone sottostante

In fase di ottimizzazione si passerà invece a quattro *layer* (figura 3.19):

- Segnale
- Piano di massa
- Alimentazione di +12V e +5V
- Alimentazione di -12V e piste secondarie non presenti nel primo livello

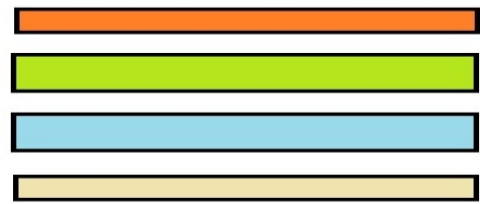


Figura 3.19

In fase di ottimizzazione si dividerà la massa analogica dalla massa di alimentazione per unirle successivamente a un riferimento in comune, raccogliendo invece alimentazione positiva e negativa in un unico *layer*. Qualora l'attuale configurazione sia considerata adeguata, è possibile che tale alternativa non venga messa in atto.

Il comportamento termico del circuito non costituisce un problema sia per le piccole correnti (pochi mA) che per le temperature a cui si opera in alta quota (intervallo di $-10^{\circ}\text{C}/0^{\circ}\text{C}$), in particolare se si andrà ad utilizzare una gabbia di Faraday non dovrebbe verificarsi un surriscaldamento generale.

Per la scelta della larghezza delle piste per il segnale, essendo questo molto delicato si è deciso di utilizzare un *tool* online (figura 3.20), in cui inserendo i seguenti valori si ottiene la larghezza minima necessaria [32]:

- Temperature operative, si è scelto 30°C così da poter effettuare test in laboratorio senza rischi, le temperature ridotte vanno infatti ad abbassare la resistenza interna
- Innalzamento termico massimo di 10°C
- Correnti erogate di 150mA (valore sovrastimato)

I parametri sulle piste richiesti invece sono stati:

- Lunghezza, scegliendo quella più lunga presente nella PCB
- Innalzamento termico, posto di massimo 10°C [33]
- Lo spessore delle piste, di 5mil (millesimi di pollice) corrispondente a 0,127mm

Inputs:		
Current	0.3	Amps
Thickness	5	mil
Optional Inputs:		
Temperature Rise	10	Deg C
Ambient Temperature	30	Deg C
Trace Length	40	mm

Results for Internal Layers:		
Required Trace Width	0.0409	mm
Resistance	0.138	Ohms
Voltage Drop	0.0415	Volts
Power Loss	0.0125	Watts
Results for External Layers in Air:		
Required Trace Width	0.015	mm
Resistance	0.360	Ohms
Voltage Drop	0.108	Volts
Power Loss	0.0324	Watts

Figura 3.20
A sinistra i dati in input
A destra i valori di output

Il valore consigliato per i *layer* interni è di 0,0409mm mentre per quelli esterni di 0,0157mm. Si è deciso quindi di utilizzare una larghezza di 0,2mm (sovrastima) [31][32].

Agli angoli della PCB sono stati fatti quattro fori *mounting hole* per viti M4 di diametro 4,2 mm (alternativamente si può portare a M5, ma sono meno comuni) per consentire il montaggio sul *case* del drone e il fissaggio di eventuali strutture (gabbia di Faraday, supporto per il Raspberry Pi, cablaggi...).

Per le vie passanti tra i *layer* della PCB, si è scelto un foro di diametro interno pari alla larghezza delle piste (0,2mm).

Per la disposizione dei componenti si è deciso di dividere la scheda in due sezioni:

- Parte destra per i circuiti destinati al segnale (Amplificatori, filtro passa banda...)
- Parte sinistra per l'alimentazione (transistor, regolatore di tensione...)

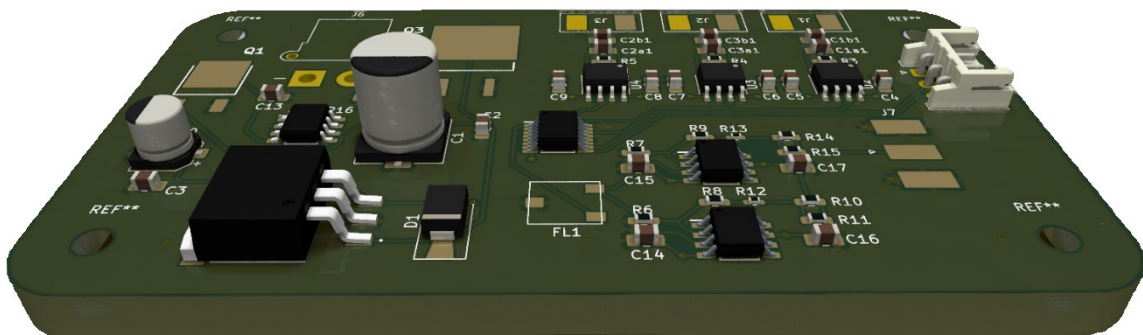


Figura 3.21,
Rendering 3D della scheda SMD

Altri accorgimenti fatti in fase di stesura piste sono stati [34][35]:

- Lunghezza piste più ridotta possibile
- I componenti più sensibili sono stati circondati da GND
- I segnali differenziali vanno messi in parallelo e schermati insieme, così in caso di interferenze, esse si ripercuotono su entrambe le piste
- Separare la parte analogica da quella digitale (Porta A e B del commutatore)
- Si è mantenuta la configurazione e disposizione di ogni componente per ogni stadio di amplificazione
- I componenti sono stati posizionati mantenendo un'uniformità di disposizione (verticali) su una griglia di 25mils
- I condensatori di filtro sono stati posti il più vicino possibile all'integrato, in particolare vicino ai pin di alimentazione rispetto alla massa
- I connettori sono stati posti lungo i bordi della scheda per facilitare il collegamento
- Le piazzole a cui verranno saldate le tre antenne sono state poste lontano dagli altri componenti

Si è utilizzato un piano di massa per ridurre i disturbi (aumenta la capacità distribuita su ogni filo riducendo il rumore irradiato) permettendo di agire parzialmente contro i rumori esterni.

Un altro vantaggio è la riduzione dell'impedenza dei contatti di massa diminuendo il rumore condotto.

Il circuito contiene una parte analogica e una digitale, è quindi preferibile separare sia i due piani di massa che il posizionamento dei gruppi di componenti. In tale modo si evita che lo *switching* della parte digitale (tra 0 e 1 e 0V -3,3V per esempio) provochi dei disturbi sulle linee analogiche. I due piani di massa sono poi collegati insieme in un punto unico in modo da portarli allo stesso potenziale (eventuale ottimizzazione).

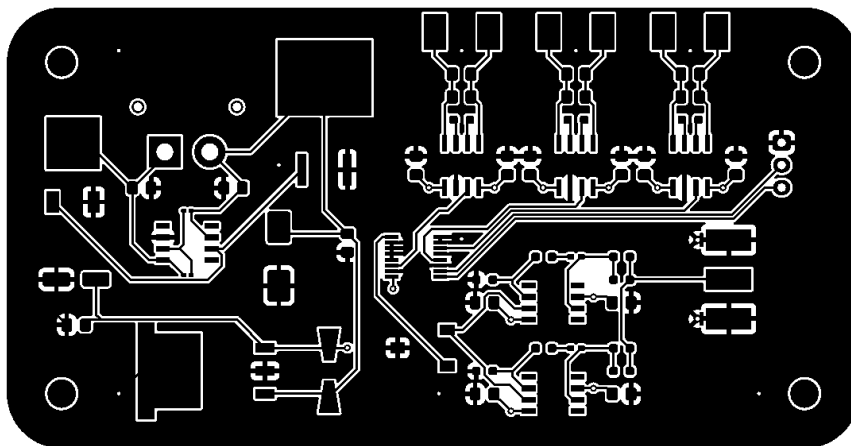


Figura 3.22,
Vista dall'alto delle piste nella
scheda a 2 layer

Conclusioni

Il progetto SEALS nasce nel 2020 grazie all'Università degli Studi di Padova che lo approva inserendolo nella categoria dei 'Progetti Studenteschi Innovativi', secondo per fondi di ricerca destinati.

Ha subito numerose rivoluzioni (inizialmente il nome del progetto era AVERLA) e il periodo del Covid-19 ne ha rallentato fino a sospendere gli sviluppi per quasi un anno.

Il 2022 ha dato nuova vita al progetto, il team si è arricchito facendo numerosi passi avanti dal punto di vista informatico ed elettronico, si è posto inoltre come scadenza fine anno 2022/inizio 2023 per eseguire i primi test di volo a Cortina con il team; questo obiettivo è stato raggiunto.

Terminati i test di fine anno sarà necessario ottimizzare non solo la scheda ma anche l'antenna e provvedere alla miniaturizzazione con conseguente riprogettazione del circuito e a seguire una nuova sessione di testing su interferenze e stabilità del segnale.

Ad oggi è in fase di sviluppo da parte degli informatici l'algoritmo di inizio ricerca in grado di individuare un primo segnale, attualmente la scelta di sviluppo consiste nel creare una matrice di dimensioni $N \times N$ dell'area di valanga e in modo procedurale analizzarla per righe/colonne in cerca di un primo segnale. Non si escludono però in futuro altre varianti di ricerca.

Le possibilità di rendere disponibile questo drone al Soccorso alpino e al pubblico permetterebbe di velocizzare e rendere più sicure le fasi di ricerca, tutelando e agevolando il soccorritore.

Ad oggi l'intenzione è quella di inserire successivamente un sistema di comunicazione con i soccorsi per trasmettere le coordinate GPS e i parametri vitali del disperso (negli ARTVA di nuova generazione ciò è possibile), anche se la comunità etica in Europa attualmente non rende possibile la trasmissione di questi dati sensibili per scelte etiche (la ricerca di un disperso rispetto a un altro non dovrebbe essere influenzata dalle sue condizioni vitali).

Inoltre in Europa esistono delle leggi che non permettono l'impiego di droni dotati di volo autonomo, si dovrà quindi trovare un'alternativa e sviluppare un algoritmo dotato di intelligenza artificiale che possa indicare la direzione della sorgente al pilota del drone, senza andare a influire sul tempo di ricerca.

Il parametro fondamentale che si ricerca dal primo giorno di sviluppo è l'affidabilità della ricezione ed elaborazione del segnale che non deve portare a errori o interpretazioni errate.

Lo scopo è quello di fornire un prodotto che sia più vantaggioso e versatile rispetto agli attuali sistemi di ricerca, e non solo una semplice alternativa.

Bibliografia

- [7] Elettronica in 30 lezioni, rassegna radio Edizioni
- [9] Manuale di elettronica e telecomunicazioni V edizione, Hoepli, G. Biondo e E. Sacchi
- [10] Datasheet Mammut Barryvox® S
- [11] Dati ricavati dal team telecomunicazioni e interferenze SEALS, Cortina, 10/12/20217
- [12] Documentazione SEALS
- [14] Datasheet AD8428, Analog Devices
- [15] Datasheet LT1028, Linear Technologies
- [16] Datasheet μ A741
- [17] Datasheet MJD32CA
- [18] Datasheet NJVMJB41CT4G
- [19] Datasheet HMC245AQS16E
- [20] Datasheet LM7805
- [24] Codice scritto con i compagni di corso: Boschetti V, Sandron A, Rossi A
- [25] Documentazione Ing. Pietro de Paolis
- [26] Documentazione prof. Vito de Trizio
- [28] Datasheet SAW455D
- [33] Tabella IPC-2221
- [34] Progettazione di circuiti stampati, Paolo Perego
- [35] Clyde F. Coombs, Jr., (2008), Printed Circuits Handbook, Sixth Edition. McGraw-Hill

Sitografia

- [1] SLF, istituto federale per lo studio della neve e delle valanghe
- [2] Ufficio federale dell'ambiente, Stefan Margreth, Unità Ricerca Sistemi Allerta e Prevenzione
- [3] www.outdoortest.it
- [4] LE ALPI, Kurt Winklear Frank Techel e Adrian Fischer, 01/2017
- [5] www.montagna.tv
- [6] CAI
- [8] [https://it.wikipedia.org/wiki/Interferenza_\(telecomunicazioni\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Interferenza_(telecomunicazioni))
- [13] <https://www.helipal.com/products/tarot-drone-tarot-650-sport-quadcopter-build-kit>
- [21] www.eleccircuit.com
- [22] www.allaboutcircuit.com
- [23] www.mcmajan.com
- [27] www.utmel.com
- [29] www.analog.com
- [30] www.PCBWAY.com
- [31] www.baselectron.com
- [32] www.sfcircuits.com