

(علمی - ترویجی)

روش‌های کاهش صدای تولیدی پهپادها

پرنده‌های بدون سرنشین (کوادکوپتر، هگزاکوپتر، اوکتاکوپتر و غیره) می‌توانند منبع تولیدکننده سرو صدای شدیدی باشند. سرو صدای تولیدی زیاد این پرنده‌ها آن‌ها را برای مناطق با جمعیت بالا به ویژه در شرایط بلند شدن از زمین و فرود آمدن یا پرواز در سطوح پایین نامناسب می‌کند. این پژوهش به بررسی روش‌ها و ارائه راهکارهایی جهت کاهش یا از بین بردن سرو صدای تولیدی پهپادها می‌پردازد. برای کاهش سرو صدای تولیدی هر دو روش فعال و غیرفعال در نظر گرفته شده است. راهکارهایی همچون صدا خفه‌کن برای موتورهای پیستونی، پروانه از نوع *Q-tip* افزایش تعداد پره‌های پروانه، مرزهای جاذب و بازتاب‌دهنده، پره‌های داکت شده، داکت‌های جاذب صوت، همگام‌سازی، کاهش نویز چند کاناله فعال به همراه سیستم ثانویه تعبیه شده به صورت مدور در اطراف پروانه و سیستم‌های با پروانه‌های مغناطیسی معرفی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: پهپاد، سرو صدا، ملخ، جذب صدا، کنترل نویز فعال

مصطفی محمودی^{۱*} و علی مرادی^{۱**}

۱- مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، کدپستی: ۱۵۸۷۵-۱۷۷۴.

* دانشیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

mostafamahmoodi@mut.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی ارشد

Methods for Attenuation of Unmanned Aerial Vehicle Noise

Unmanned aerial vehicles (UAVs) like drones (quadcopters, hexacopters, octocopters, etc.) can be a source of significant acoustic noise. High noise makes them less suitable for use in densely populated urban areas, particularly during take-off, landing, and low-level flight, due to the noise annoyance. This paper reviews the methods and proposes some concepts for the attenuation of UAV noise. Both passive and active solutions are considered. Solutions with piston engine silencer, *Q-tip* propeller, more propeller blades, absorptive and reflective barrier, ducted propeller, sound absorbing ducts, synchrophaser, multichannel active noise cancellation (ANC) system with secondary sources circularly arranged around the propeller and the system with magnetically excited propeller blades are mentioned.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Noise, Propeller, Sound Absorption, Active Noise Control

M. Mahmoodi^{1*} and A. Moradi^{1**}

1- Aerospace University Complex, MalekAshtar University, Postal Code: 15875-1774, Tehran, IRAN

* Associate Professor (Corresponding Author): Email:

mostafamahmoodi@mut.ac.ir

** M.Sc. Student

۱- مقدمه

پهپاد یا پرنده هدایت پذیر از دور، هواپیمایی است بدون خلبان که مجهز به سیستم‌های پروازی خودکار و از راه دور است. از جمله کاربردهای این نوع پرنده‌ها می‌توان به کاربرد عمومی، تجاری، نظامی و برنامه‌های فضایی اشاره کرد [۱، ۲]. این پرنده‌ها به‌طور عمده سرو صدای بلند و مشخصی تولید می‌کنند که منجر به ناراضیتی شده و استفاده از آن‌ها را در مناطق شهری و پروازهای ارتفاع پست به ویژه در بلند شدن از زمین و فرود را با مشکل مواجه می‌کند. ناراضیتی فقط به دلیل بلندی سرو صدای تولیدی این پرنده‌ها نبوده، بلکه به طول موج تولیدی نیز وابسته است [۳].

به صورت عمده می‌توان روش‌های کاهش نویز در پهپادها را به دو دسته فعال و غیر فعال تقسیم‌بندی کرد. روش‌های غیرفعال به خوبی شناخته شده و ثابت شده هستند [۴، ۵]، اما این روش‌ها به‌طور عمده دارای ابعاد بزرگی بوده و کارایی مناسبی در کاهش صدای تولیدی در فرکانس‌های پایین را ندارند [۶]. از طرف دیگر، روش‌های فعال نوید کاهش بالقوه سرو صدا در فرکانس‌های پایین را می‌دهند [۹-۷]. اگرچه این روش‌ها اکثریت در مراحل مفهومی بوده و در عمل امتحان نشده است و نیازمند منبع اضافی انرژی می‌باشند. ترکیب این دو روش شاید بتواند تعادل مناسبی در کارایی و مصرف انرژی را به همراه داشته باشد.

۲- انواع پهپادها

پهپادها را می‌توان به طور کلی به دو گروه بال ثابت و پهپادهایی با پره‌های چرخشی تقسیم کرد. اولین پهپادها در واقع هواپیمای کنترل از راه دور کوچک مجهز به سیستم‌های الکترونیکی اضافی برای تعیین مسیر و شناسایی بودند [۱، ۲]. نمونه‌ای از این نوع پرنده‌ها را می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد.



شکل (۱): پهپاد بال ثابت MQ-9 [۱].

پهپادهای بال ثابت اکثریت با موتور بیستونی کوچک (دیزلیا بنزینی) یا موتور توربوپراپ و به ندرت با استفاده از موتور الکتریکی

(به دلیل محدودیت جابجایی) ساخته می‌شوند [۱۲-۱۰]. کاهش سرو صدا در این نوع پهپادها به طور معمول به سوی کم کردن نویز تولیدی موتور و ملخ‌ها سوق پیدا می‌کند. در یک پهپاد بال ثابت، ملخ می‌تواند در جلو یا در عقب پهپاد باشد. در صورت استفاده از موتور با ملخ در انتهای پهپاد یا استفاده از موتور توربوپراپ، نویز حاصل از گذر جریان گاز داغ از پره‌ها نیز به دیگر نویزها اضافه می‌شود. از سوی دیگر، پرنده‌های با بال‌های چرخان که اغلب هلیکوپترهای کوچک یا دستگاه‌های چند پروانه‌ای هستند. پهپادهای چند پروانه‌ای می‌توانند در همه جهات از جمله افقی، عمودی و مورب جابه‌جا شوند و یا شناور در نقطه‌ای مشخص بمانند.

از نمونه‌های معمول این نوع پهپادها کوادکوپترها با چهار پروانه (شکل ۲)، هگزاکوپترها با شش پروانه (شکل ۳) و اوکتاکوپترها با هشت پروانه (شکل ۴) می‌باشند. کوادکوپترها و هگزاکوپترها بسیار ساده‌تر از انواع دیگر بوده و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، به طوری که نمونه‌های کوادکوپتر برای پهپادهای کوچک بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. این نوع طراحی بسیار ساده‌تر است، اما در مقابل از دست دادن موتورها مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد. اوکتاکوپترها بسیار قدرتمندتر و سنگین وزن‌تر از نمونه‌های کوادکوپتر هستند.



شکل (۲): کوادکوپتر (DJI) [۱].



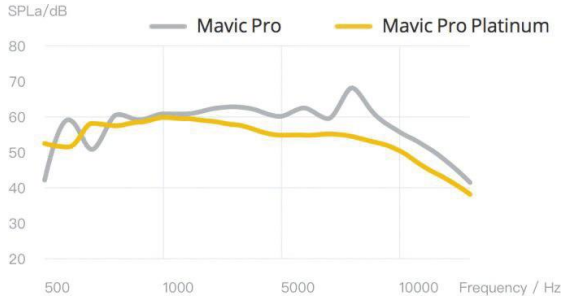
شکل (۳): هگزاکوپتر (Yuneec) [۱].



شکل (۴): اوکتاکوپتر (Dragon RC) [۱].

جدول (۱): سطوح نویز برای پهپادهای کوچک در فاصله نزدیک [۱۴].

نوع پهپاد	سطح نویز (dB)
Mavic Pro	۹۸
Mavic Pro Platinum	۹۳
Mavic Air	۹۹



شکل (۶): طیف‌های نویز برای دو پهپاد معروف (DJI) [۶].

همه منابع تولید نویز به یک اندازه مهم نیستند. برخی از این منابع غالب صدا را تولید و دیگر منابع فقط به نویز کلی اضافه می‌کنند. هر منبعی که چندین دسی‌بل نویز کمتری تولید کند، به دلیل عدم تاثیر در کل نویز تولیدی می‌توان نادیده گرفت [۶]. فشار صدا به ازای دوبرابر شدن فاصله از منبع تولیدی آن مقدار ۶ دسی‌بل کاهش می‌یابد (این مقدار با توجه به منطقه جغرافیایی می‌توان بین ۳ تا ۷ دسی‌بل متغیر باشد). رابطه (۱) میزان تغییر شدت صوت ناشی از اختلاف فاصله را نشان می‌دهد. در معادله مقادیر L_1 و L_2 مقادیر فشار صوت بر حسب دسی‌بل در فاصله‌های d_1 و d_2 از منبع می‌باشند [۱۵].

$$L_1 - L_2 = 20 \log \frac{d_2}{d_1} \quad (1)$$

۳-۱- نویز تولیدی موتور پیستونی

نویز حاصله از موتور پیستونی، ناشی از فشار پالس‌های موتور در دهانه ورودی و خروجی در سیکل رفت و برگشتی موتور چهار زمانه است. منبع نویز حاصله موتور، لوله خروجی آگزوز است. نویز حاصله از یک موتور پیستونی کوچک می‌تواند در حدود ۸۵ دسی‌بل و بالاتر باشد. سرعت احتراق سیلندر (f_{CFR}) به سرعت چرخش (N_{RPM}) وابسته است که برای موتور دو زمانه بصورت زیر ارائه شده است [۱۴].

$$f_{CFR} = \frac{N_{RPM}}{60} \quad (2)$$

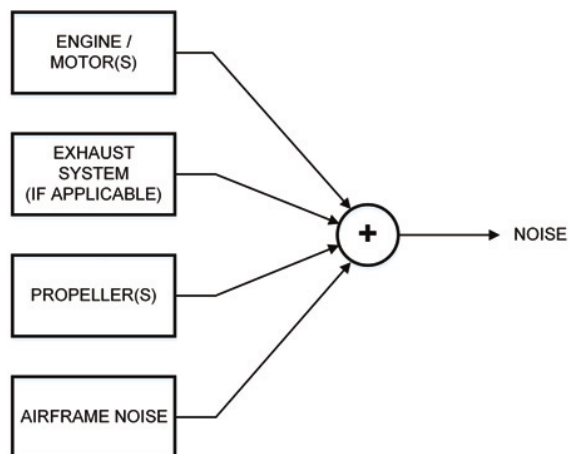
این رابطه برای موتور ۴ زمانه بصورت زیر ارائه شده است:

$$f_{CFR} = \frac{N_{RPM}}{120} \quad (3)$$

سیستم رانش مورد استفاده پهپادهای چند روتوری به طور معمول موتورهای الکتریکی (استفاده از باتری برای قدرت دادن به موتورها) یا موتورهای پیستونی می‌باشند که به صورت خیلی کم به چرخش پروانه‌ها می‌پردازند، اما می‌توانند ژنراتور الکتریکی را به جهت تولید نیرو به چرخش دریاورند [۱۳]. بر اساس وزن می‌توان پهپادها را به گروه پهپادهای سبک (بیش از ۲۵ کیلوگرم و کمتر از ۱۵۰ کیلوگرم) یا پهپادهای سنگین (بیش از ۱۵۰ کیلوگرم) تقسیم‌بندی کرد.

۳- منابع نویز تولیدی پهپادها

منابع عمومی تولید نویز در شکل ۵ نشان داده شده است [۱۴]. بعضی از منابع برای مدل‌های خاصی از پهپادها کاربرد ندارند. یکی از منابع اصلی تولید نویز موتور این پهپادها می‌باشد. حتی پهپادهای کوچک نیز می‌توانند نویز قابل توجهی در فواصل نزدیک تولید کنند. با توجه به جدول ۱ پهپاد مویک پرو پلاتینیوم (حدود ۹۳ دسی‌بل (به لطف استفاده از نوک چرخشی خاص در مدل پلاتینیوم) و مویک ایر (حدود ۹۹ دسی‌بل (به علت سرعت چرخش بیشتر) تولید می‌کنند. پهپادهای بزرگتر میزان بیشتری نویز تولید می‌کنند. می‌توان قانون کلی به این صورت تعریف کرد که هرچه پهپاد کوچک‌تر نویز تولیدی آن نیز کمتر می‌باشد. اگر چه مواردی همچون ابعاد ملخ نسب به وزن، سرعت چرخش موتور، طراحی ملخ و نسبت پروانه به بدنه نیز مؤثر هستند. نمونه بازه تولیدی صدا برای دو پهپاد معروف در شکل ۶ ارائه شده است. وجود نویز تولیدی در فرکانس‌های بالا از عناصر ناراضیاتی بیشتر است.



شکل (۵): منابع تولید نویز هواپیما [۱۴].

(علمی-ترویجی)
مصطفی محمودی و علی مرادی

به حدود ۴۱۴۰۰ دور در شرایطی که بار به همراه ندارند می‌رسد. شکل ۷ مجموعه‌ای از موتورهای الکتریکی برای پهپادها را نشان می‌دهد [۲۱].



شکل (۷): مجموعه موتورهای الکتریکی برای پهپاد [۲۰].

سرعت احتراق موتور (f_{EFR}) نیز وابسته به سرعت احتراق سیلندر در تعداد سیلندر است، بنابراین داریم:

$$f_{EFR} = N_C f_{CFR} \quad (۴)$$

فرکانس حاصل از موتور ۲ زمانه در ۱۰۰۰۰ دور ۱۶۶ هرتز بوده در حالی که موتور ۴ زمانه در همان سرعت، ۸۳ هرتز می‌باشد.

۳-۲- نوین تولیدی موتور توربوپراپ

موتورهای توربوپراپ همان موتورهای توربینی هستند که ملخ پرنده را به حرکت درمی‌آورند. نوین حاصل از توربین، همان صدای حاصل از خروج گاز از آگزوز و نوین فرکانس پایین حاصل از خروجی توربین می‌باشد. نوین آگزوز شامل نوین حاصل از احتراق و تفاوت فشار بین هوای خروجی با سرعت بالا و محیط اطراف می‌باشد. تفاوت دمایی و فشاری هوا در خروجی نقش اصلی را در نوین توربین بازی می‌کند.

۳-۴- نوین تولیدی ملخ

دسترسی از محیط بیرون به تسهیلات داخل فرودگاه (ترمینال‌ها و غیره) برای کارمندان و متصدیان از طریق تونل‌های گذرنده از زیر باند می‌باشد. برای مسافران از طریق خط ویژه‌ای به نام انتقال خودکار افراد^۵ تعبیه شده که ترمینال اصلی داخل پلان دایره را به محوطه خارجی فرودگاه و همچنین پارکینگ متصل می‌کند. شکل ۸ خط ویژه مسافران را نشان می‌دهد [۱۵].

$$f_1 = f_{BPF} = \frac{N_{RPM} N_B}{60} \quad (۵)$$

$$f_n = N f_1, N = 1.2 \dots \quad (۶)$$

f_1 یا f_{BPF} فرکانس پایه‌ای نوین تولیدی قطعه پروانه، N_{RPM} سرعت چرخش پروانه و N_B تعداد پره‌های ملخ است. با استفاده از رابطه زیر می‌توان سرعت نوک ملخ را محاسبه کرد.

$$v = \frac{D N_{RPM} \pi}{60} \quad (۷)$$

v سرعت نوک ملخ، D قطر ملخ و N_{RPM} سرعت چرخش ملخ می‌باشد. سرعت چرخش نوک پروانه (ms^{-1}) برای تعدادی از پروانه‌های با قطر کم و سرعت چرخش مشخص در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. رنگ زرد در جدول ۲ نشان‌دهنده سرعت‌های با نوین بالا ($> 100 ms^{-1}$) می‌باشد. پهپادهای کوچک از پروانه‌های با زاویه ثابت استفاده می‌کنند و نیروی رو به جلو را با تغییر سرعت چرخش پروانه و موتور الکتریکی ایجاد می‌کنند.

۳-۳- نوین تولیدی موتور الکتریکی

نوین و لرزش‌های حاصل از موتور الکتریکی ناشی از دفرمه شدن اجزای متحرک به دلیل وجود نیروهای میدان‌های الکترومغناطیسی (عدم بالانس بودن قطعات، دنده‌ها، و بلبرینگ) و جریان هوای گذری از موتور است [۱۶-۱۹]. امروزه از موتور هایدی‌سی براسلس^۱ به خاطر امکان استفاده جامع آن‌ها و بهینه بودن در مصرف انرژی استفاده می‌شود. تحریک الکتریکی موتورهای هایدی‌سی می‌تواند منجر به تشدید رزونانس مکانیکی موتور شده و صدای مانند تغییرات مغناطیسی تولید کند. در جدول ۲ می‌توان درجه نوین و طیف‌ها را مشاهده کرد [۱۶].

پراکاردترین نوع موتورهای براسلس از نوع ۳ فاز استفاده است. سرعت موتور به کمک فناوری مدولاسیون پهنای پالس^۲ تنظیم می‌شود. به صورت کلی دو روش برای کنترل سرعت موتورهای براسلس وجود دارد که عبارتند از:

۱- روش کنترل با سنسور و

۲- روش کنترل بدون نیاز به سنسور.

موتورهای براسلسی که از سنسور اثر هال^۳ اطلاعات لازم را دریافت می‌کنند. موتورهایی که بر اساس استاندارد کی‌وی^۴ در ولتاژ مشخص سرعت مشخصی دارند. موتورهای استفاده شده در پهپادها به‌طور معمول سرعت چرخش بالایی را به همراه دارند [۲۰]. سرعت چرخش پره موتورها از حدود ۱۰۳۵۰ دور شروع و

4. KV

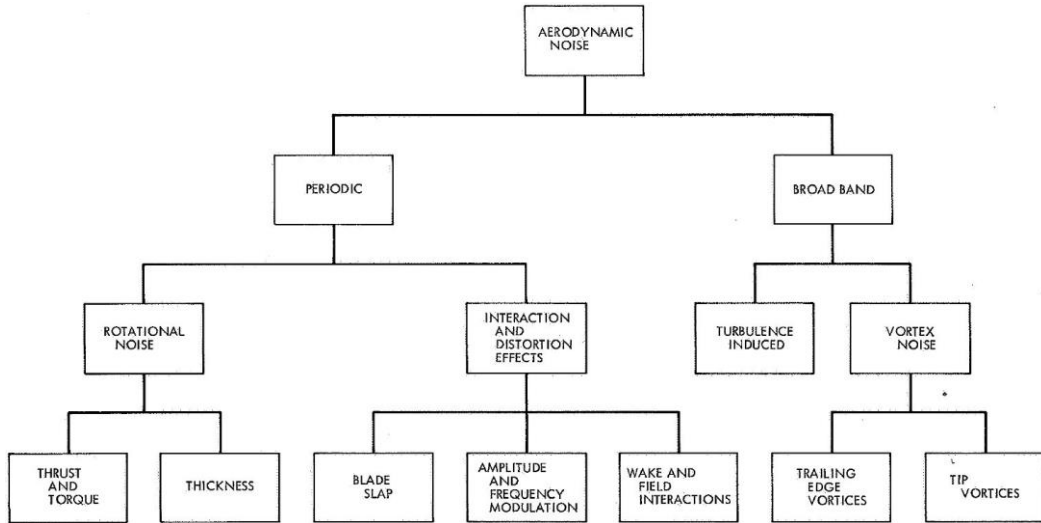
5. Automated People Mover (APM)

1. Brushless DC (BLDC)

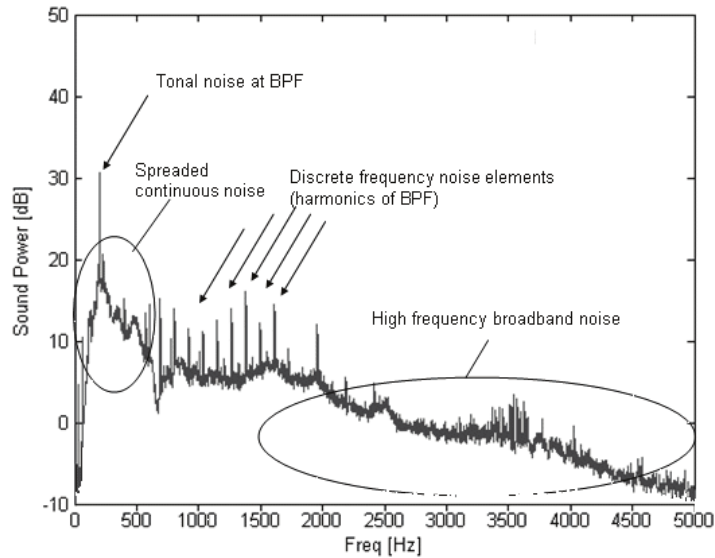
2. Pulse-Width Modulation (PWM)

3. HALL Effect Sensor

(علمی-ترویجی)
روش‌های کاهش صدای تولیدی پهپادها



شکل (۸): منابع نویز آیرودینامیکی ملخ [۲۲].



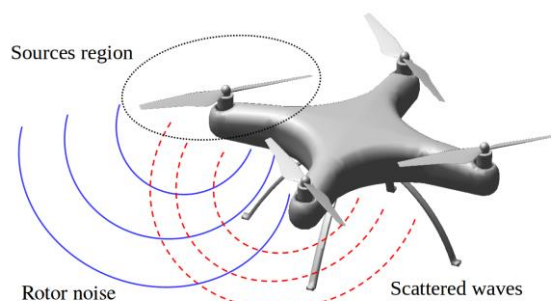
شکل (۹): طیف نویز ملخ [۲۳].

جدول (۲): سرعت‌های نوک پروانه برای قطر پروانه و سرعت‌های چرخشی مختلف [۱۶].

سرعت چرخشی (RPM)									قطر ملخ (اینچ)
۱۰۰۰۰	۹۰۰۰	۸۰۰۰	۷۰۰۰	۶۰۰۰	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰	
۳۹/۹۰	۳۵/۹۱	۳۱/۹۲	۲۷/۹۳	۲۳/۹۳	۱۹/۹۵	۱۵/۹۶	۱۱/۹۷	۷/۹۷	۳
۵۳/۲۰	۴۷/۱۸	۴۲/۵۶	۳۷/۲۴	۳۱/۹۲	۲۶/۶۰	۲۱/۲۸	۱۵/۹۶	۱۰/۶۴	۴
۶۶/۵۰	۵۹/۸۵	۵۳/۲۰	۴۶/۵۵	۳۹/۹۰	۳۳/۲۵	۲۶/۶۰	۱۹/۹۵	۱۳/۳۰	۵
۷۹/۸۰	۷۱/۸۲	۶۳/۸۴	۵۵/۸۶	۴۷/۸۸	۳۹/۹۰	۳۱/۹۲	۲۳/۹۴	۱۵/۹۶	۶
۹۳/۱۰	۸۳/۷۹	۷۴/۴۸	۶۵/۱۷	۵۵/۸۶	۴۶/۵۵	۳۷/۲۴	۲۷/۹۳	۱۸/۶۲	۷
۱۰۶/۴	۹۵/۷۶	۸۵/۱۲	۷۴/۴۸	۶۳/۸۴	۵۳/۲۰	۴۲/۵۶	۳۱/۹۲	۲۱/۲۷	۸
۱۱۹/۷	۱۰۷/۷	۹۵/۷۶	۸۳/۷۹	۷۱/۸۲	۵۹/۸۵	۴۷/۸۸	۳۵/۹۱	۲۳/۹۴	۹
۱۳۳/۰	۱۱۹/۷	۱۰۶/۴	۹۳/۱۰	۷۹/۸۰	۶۶/۵۰	۵۳/۲۰	۳۹/۹۰	۲۶/۶۰	۱۰
۱۴۶/۳	۱۳۱/۷	۱۱۷/۰	۱۰۲/۴	۸۷/۷۸	۷۳/۱۵	۵۸/۵۲	۴۳/۸۹	۲۹/۲۶	۱۱
۱۵۹/۶	۱۴۳/۶	۱۲۷/۷	۱۱۱/۷	۹۵/۷۶	۷۹/۸۰	۶۳/۸۴	۴۷/۸۸	۳۱/۹۱	۱۲

۳-۵- نویز تولیدی بدنه

همه منابع تولید نویز به یک اندازه مهم نیستند. برخی از این منابع غالب صدا را تولید می‌کنند و دیگر منابع فقط به نویز کلی اضافه می‌کنند، به عنوان مثال ترکیبی از موتور و پروانه‌ها. بعضی از منابع برای مدل‌های خاصی از پهپادها کاربرد ندارند (مانند مولتی‌روتورها). یکی از منابع اصلی تولید نویز موتور این نوع پهپادها می‌باشد. منابع عمومی تولید و انتشار نویز این نوع پهپادها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هر منبعی که چندین دسی‌بل نویز کمتری تولید کند، به دلیل عدم تاثیر در کل نویز تولیدی می‌توان نادیده گرفت. به صورت عمده می‌توان در مقابل دیگر منابع‌های تولیدکننده نویز از سرو صدای تولیدی توسط بدنه صرف‌نظر کرد (مانند ملخ و موتور) [۱۴].



شکل (۱۰): طرحی از تولید و انتشار صدای پهپاد [۱۴].

۳-۶- سطح نویز تولیدی از چند منبع

متوسط فشار صوت تولیدی از مجموعه‌ای از منابع‌های ناهمگون به وسیله رابطه (۸) تعریف می‌شود [۶]. که در آن n تعداد منابع‌ها و L_n نیز میزان فشار تولیدی صوت منبع مشخص در واحد دسی‌بل می‌باشد.

$$L_{\Sigma} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad (8)$$

افزایش نویز ناشی از منابع‌های ناهمگون ΔL به وسیله رابطه (۹) مشخص می‌شود.

$$\Delta L = 10 \log_{10}(n) \quad (9)$$

منابعی که بیشترین نقش را در تولید صدا دارند مهم شمرده می‌شوند و می‌توان از منابعی با تولید نویز کمتر صرف نظر کرد. روند افزایش نویز حاصل از چند منبع ناهمگون در جدول ۳ برشمرده شده است.

۴- اثرات طرح

روش‌هایی که می‌توانند برای کاهش نویز تولیدی پهپاد به کار برد عبارتند از:

- صدا خفه‌کن موتور پیستونی (منبع آگزوز)،

- تغییر ایرفویل تیغه پروانه (مانند پروانه Q-tip، لبه عقبی دنداندار)،
- پروانه‌هایی با تیغه‌های بیشتر،
- مرزهای جاذب و بازتاب‌دهنده و
- پروانه‌های مجرادار (شیلد شده) به همراه جاذب‌های صوتی.

جدول (۳): سهم منابع صوتی ناهمگون [۷].

منبع	سطح نویز (dB)
۱	۰
۴	۰-۶
۶	۷-۸
۸	۰-۹

۴-۱- صدا خفه‌کن موتور پیستونی (منبع آگزوز)

نویز حاصل از موتورهای پیستونی را می‌توان با استفاده از جاذب‌ها و یا صداخفه‌کن‌ها (منبع آگزوز) کاهش داد [۲۴، ۲۵]. در جدول ۴ سطح نویز تولیدی برای چند نمونه از ترکیب‌های ملخ و موتور و منبع آگزوز نشان داده شده است. شکل‌های ۱۱ و ۱۲، ساختار موتور به همراه صداخفه‌کن را نشان می‌دهند [۲۶]. وظیفه اولیه یک سیستم آگزوز یا ورودی هوا هدایت موثر هوای تازه به موتور و خروج گازهای خروجی به جو و به حداقل رساندن انتشار صدای ورودی و خروجی است. همچنین، ورودی‌ها باید ذرات هوا را فیلتر کنند، در حالی که ممکن است سیستم‌های آگزوز برای پردازش گازهای خروجی برای برآورده کردن استانداردهای انتشار آگزوز تجویز شده یا بازیابی گرمای تلف شده مورد نیاز باشند. به طور کلی، گاز باید برای کاهش نویز کار کند که منجر به کاهش فشار می‌شود و در نتیجه راندمان جریان و عملکرد موتور کاهش می‌یابد. بنابراین، طراحی موثر سیستم ورودی هوا و آگزوز شامل یافتن بهترین سازش بین به حداقل رساندن انتشار نویز و به حداکثر رساندن خروجی موتور و راندمان سوخت است [۲۵]. در موتورهای بزرگ‌تر می‌توان از صداخفه‌کن در ورودی هوا نیز استفاده کرد. البته باید دقت کرد که ارتعاش موتور لرزش این بخش را بیشتر نکند. شکل ۱۳ تأثیر صدا خفه‌کن بر روی طیف صدای آگزوز را نشان می‌دهد [۲۷].

جدول (۴): سطح نویز تولیدی برای چند نمونه از ترکیب‌های ملخ و موتور و منبع آگروز [۲۶].

مدل	موتور	ملخ	صدا خفه‌کن	RPM	dB
Aero 10	OS 15 FB	8×5 Graupner	Standard + pipe	۹۳۰۰	۷۰
Tiger trainer	Th Tigre GP 40	11×7 Kyosho	Std + Mouse	۹۰۰۰	۷۱
Speedy Bee	OS 26 FS	10×6 Graupner	Standard	۹۲۰۰	۷۱
Wot 4	OS 40 FP	11×6 Graupner	Std + mute	۹۸۰۰	۷۲
O/D	ASP 12	8 × 4 Graupner	Std	۹۱۰۰	۷۲
U-Sky	OS 46 LA	11×7 Graupner	Std + anti vib. Mount	۹۳۰۰	۷۲
Own 4	OS46LA	11×7 Graupner	Standard	۹۲۰۰	۷۳
Commanche	OS 40 FP	11×7 APC	Standard	۶۵۰۰	۷۴
High Boy	OS 40 FP	11×6 Master	Standard	۹۸۰۰	۷۴
Own Design	OS40 Blue	10. 5×6 Graupner	Standard	۹۵۰۰	۷۵



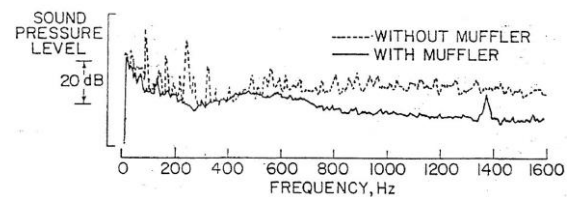
شکل (۱۴): پروانه با شکل Q-tip [۲۸].



شکل (۱۱): موتور پیستونی دو زمانه کوچک به همراه صداخفه‌کن [۲۶].



شکل (۱۲): نمای داخلی صداخفه‌کن واکنشی کوچک [۲۶].



شکل (۱۳): تاثیر صدا خفه‌کن بر روی طیف صدای آگروز [۲۷].

۴-۳- استفاده از پروانه‌های با تعداد تیغه بیشتر

در حال حاضر ملخ‌های با دو تیغه در پهپادها مرسوم هستند. همان مقدار نیرو را می‌توان با پروانه‌ای با قطر کمتر ولی تعداد تیغه‌های بیشتر به دست آورد (سه، چهار، پنج و یا شش تیغه). نمونه‌ای از پروانه ۶ تیغه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. افزایش تعداد تیغه‌ها به سرعت کمتر نوک تیغه‌ها و کاهش کارایی می‌انجامد. سرعت کمتر نوک تیغه نویز تولیدی را نیز کاهش می‌دهد. بالانس کردن ملخ‌های با تعداد تیغه‌های بالا سخت خواهد بود و نیازمند تلاش بیشتری است، اما نتیجه می‌تواند به شکل تأثیرگذاری در کاهش مقدار لرزش‌ها و نویز تولیدی خود را نشان دهد. تغییرات دست یافته با افزایش تعداد تیغه‌ها با توجه به مرجع [۲۷] در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۵): پروانه‌های شش تیغه‌ای برای یک پهپاد [۲۸].

۴-۲- تغییر شکل تیغه‌ها

شکل تیغه و ایرفویل با توجه به جدول ۴ اثر کوچکی در حد ۴ تا ۴/۵ دسی‌بلبر کاهش نویز تولیدی دارد. یکی از پرکاربردترین روش‌ها Q-tip است که ابتدا در سال ۱۹۷۰ توسعه یافت که تحت زاویه ۹۰ درجه‌ای خم شده که منجر به کاهش نویز تولیدی می‌شود [۲۸]. این روش، جریان هوایی خروجی را به همان روشی که لبه پروانه منجر به کاهش گرداب‌های نوک بال می‌شود، کاهش می‌دهد. پروانه‌ای با تشابه در روش خمش پروانه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

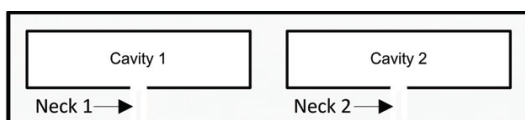
می‌تواند در حدود چند دسی‌بل نویز در بازه فرکانسی پایین و میانه را کاهش دهد [۳۴].



شکل (۱۷): پروانه مجرادار.



شکل (۱۸): طرح آینده پهپادهای مسافری با استفاده از پروانه‌های مجرادار [۳۴].



شکل (۱۹): سطح جاذب صوت [۳۴].

۵- روش‌های فعال برای کاهش نویز پهپاد

روش‌های فعال با توجه به پیچیدگی بسیار، به طور معمول برای پهپادهای بزرگ که نویز بیشتری تولید می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرند و عبارتند از:

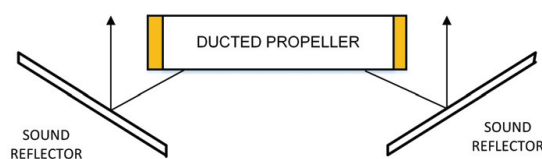
- همگام‌سازی برای کاهش نویز و ضربه‌های ناشی از ملخ‌ها،
- کاهش نویز فعال که برای اینکار از مجموعه بلندگوها که به شکل دایره‌ای در اطراف پروانه نصب شده‌اند استفاده می‌کند و
- پروانه‌هایی با آهنربایی کوچک که در میدان مغناطیسی تولید شده توسط کوئل موجود در ساختار بدنه ارتعاش می‌کند.

جدول (۴): تغییرات کاهش نویز با افزایش تعداد تیغه‌ها [۲۷].

تعداد تیغه‌ها	کاهش نویز
دو تا سه	-4 dB
سه تا چهار	-4.5 dB
چهار تا پنج	-4.5 dB

۴-۴- استفاده از مرزهای جاذب و بازتاب‌دهنده

سر و صدای حاصل از پهپادها در تمامی جهات انتشار می‌یابد، که می‌تواند منجر به ایجاد ناراحتی شود. به کمک بازتاب‌دهنده‌ها می‌توان بخشی از نویز را به سمت بالا بازتاب داد. مواد بازتاب‌دهنده شامل سطوح سختی هستند که منجر به بازتاب امواج صوتی می‌شوند [۶]. مواد با انواع درجه‌های جذب و بازتاب می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. براساس چگالی ماده و مقدار متخلخل بودن آن، مقداری از صوت نیز جذب و تبدیل به گرما می‌شود. بازتاب‌دهنده‌ها می‌توانند با زاویه‌ای در نزدیکی لبه‌های پروانه‌ها نصب شوند. با استفاده از بازتاب‌دهنده‌های صوتی مانند شکل ۱۶ صوت به سمت بالا بازتاب می‌یابد که اثر زیست محیطی ندارد [۲۹، ۳۰].



شکل (۱۶): استفاده از بازتاب‌دهنده صوت برای بازتاب نویز پروانه [۶].

۴-۴- پروانه‌های مجرادار (شیلد شده) به همراه جاذب‌های صوتی

پروانه‌های مجرادار در ساختار سیلندری یا داکت نصب می‌شوند. نمونه‌ای از این پروانه‌ها را می‌توان در شکل ۱۷ مشاهده کرد [۳۱]. این نوع پروانه‌ها در تولید نیروی رو به جلو بسیار کارا تر از پروانه‌های معمولی با قطر یکسان می‌باشند. در اکثر مواقع این نوع پروانه‌ها منجر به تولید نویز کمتری می‌شوند [۳۲، ۳۳]. این مجراها علاوه بر موارد گفته شده می‌توانند محافظت در برابر تیغه‌ها را نیز به همراه داشته باشند (عامل امنیت) که در شکل ۱۸ نشان داده شده است [۳۴]. در این حالت فرصت استفاده از مواد جاذب در این مجراها به جهت کاهش نویز تولیدی وجود دارد. البته ضخامت مورد استفاده نیز باید مناسب با شرایط در نظر گرفته شود (یک چهارم یا یک دوم اینچ یا بیشتر). پروانه‌های مجرادار اجازه استفاده از جاذب‌هایی با شکل دایره‌ای و ابر سطح را بر اساس معادله هلمهولتز می‌دهند (شکل ۱۹). این روش

۵-۱- همگام‌ساز

همگام‌ساز ابزاری است که به صورت دقیق سرعت چرخش و فاز ملخ‌ها را با هم همگام می‌سازد (شکل ۲۰) [۳۵]. هنگامی که ملخ‌های یک موتور دارای سرعت یکسانی باشند، فرکانس عبور تیغه و دوره فشار صوتی حاصل از آن یکسان خواهند بود. اگر اختلاف فاز ثابت بین این ملخ‌ها وجود داشته باشد، فشار صوتی این ملخ‌ها کاهش می‌یابد، زیرا امواج هارمونیک ملخ‌های مختلف که دارای فرکانس، دامنه یکسان و فاز مخالف هستند، حذف می‌شود. این قطعه ملخ را با ملخ دیگر بررسی و محل تیغه‌ها را با توجه به قوس و زاویه آن‌ها تنظیم می‌کند [۳۶، ۳۷]. نویز حاصل از یک ملخ می‌تواند به صورتی تنظیم شود که به حذف نویز حاصل از ملخ دیگر بر روی همان پرنده منجر شود. از این رو، همگام‌ساز می‌تواند در پرنده‌هایی که چند ملخ یا موتور دارند، برای کاهش نویز تولیدی بهره برد. مرکز تحقیقات نیروی هوایی نسل دوم همگام‌سازها را در سال ۱۹۹۴ توسعه داد. این همگام‌ساز منجر به کاهش ۳ تا ۵ دسی‌بل نویز تولیدی در پرنده C-130 با ۴ موتور شد [۳۸].

۵-۲- سامانه فعال کنترل نویز

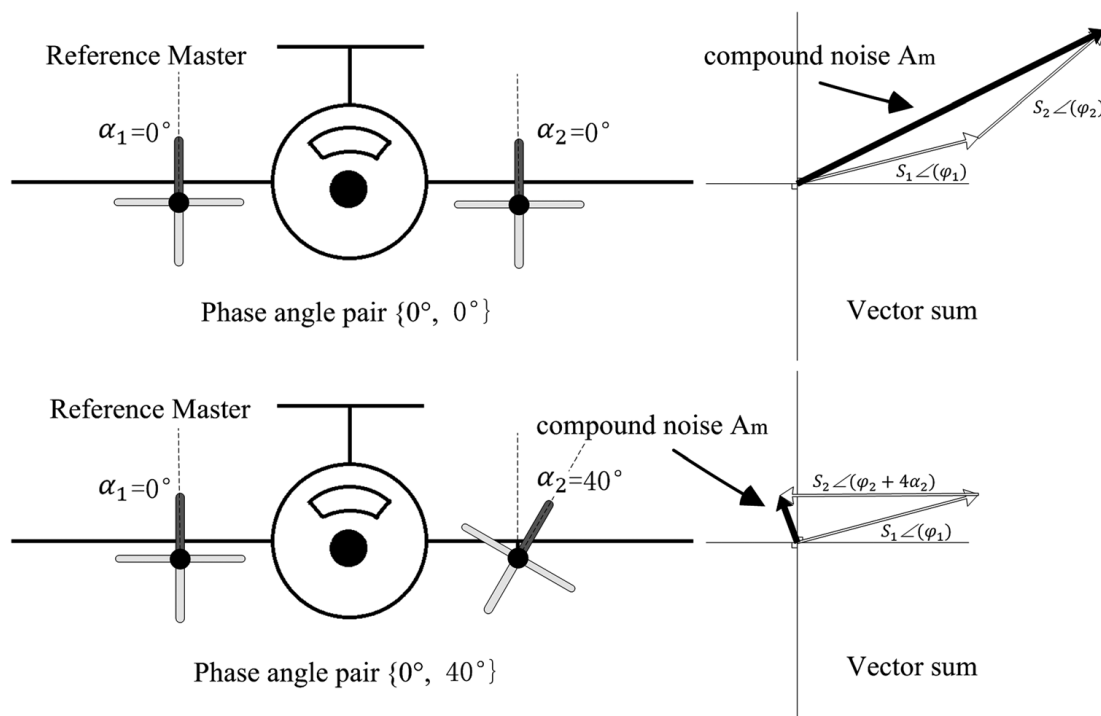
کاهش نویز چندکاناله فعال آروشی است که بر پایه تولید سیگنال آکوستیکی که با نویز تولیدی مقابله، کار می‌کند [۷۸]. استفاده از این روش منجر به کاهش قابل ملاحظه نویز حاصله از قطعات شده است. سامانه کنترل فعال نویز چند کاناله آروشی است که با تعدادی بلندگو برای کاهش نویز فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد. بلندگوها در دیواره خارجی داکت پروانه با چینش دایره‌ای قرار گرفته‌اند و صدایی تحت زاویه مشخص تولید می‌کنند. این صدا توسط کنترل‌کننده مخصوص این سامانه تولید می‌شود.

هر کانال آکوستیکی شکل موج تولید شده توسط همگام ساز ANC (شکل ۲۲) را در زاویه فازی متفاوت منتشر می‌کند. به طور مثال، در یک ترکیب ۱۲ کانالی هر کانال ۳۰ درجه با دیگری تفاوت دارد. برای یک پروانه ۳ تیغه‌ای این ۱۲ کانال به ۳ گروه ۴ کاناله تقسیم می‌شوند (کانال‌هایی یک گروه مشابه هم هستند). تولیدکننده موج [۳۹] در خود نمونه‌های بسیاری دارد که بر اساس رابطه (۱۰) ساخته شده است

$$w_l(n) \cdot l = 0.1 \dots L - 1 \quad (10)$$

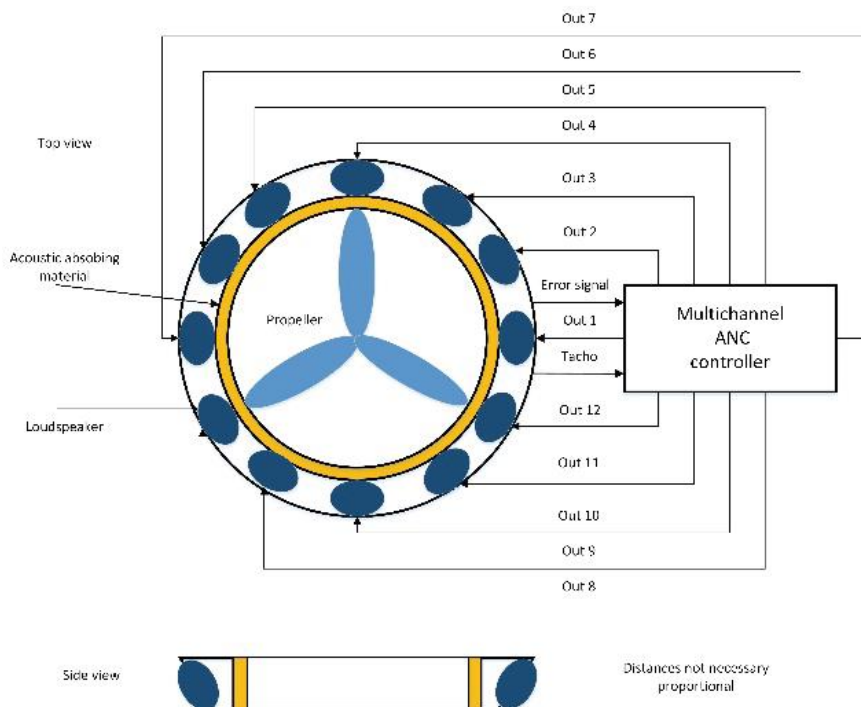
$$y(n) = w_{j(n)}(n) \quad (11)$$

$$j(n) = n \bmod L \quad (12)$$

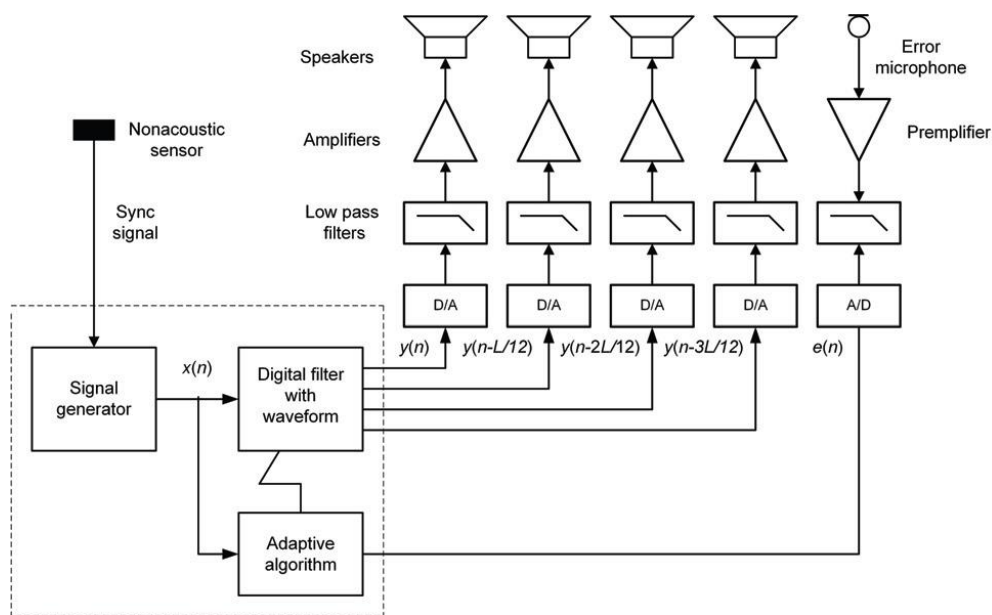


شکل (۲۰): همگام‌سازی و میرایی صوت [۳۵].

(علمی-ترویجی)
مصطفی محمودی و علی مرادی



شکل (۲۱): کنترل نویز چندگانه نویز پروانه [۸].



شکل (۲۲): کنترل نویز چندگانه با چهار کانال [۳۹].

قرار داده شده در فن می‌تواند با آهنرباهای کوچک قرار داده شده در نوک تیغه‌ها تعامل برقرار کرده و باعث ایجاد تغییرات جزئی در حرکت چرخشی پره‌های فن شود. این موضوع به خود فن اجازه می‌دهد که سیگنال ضد نویز را در خود تیغه تولید کند. با این روش می‌توان در محل تولید نویز با دقت بالایی سیگنال حذف‌کننده تولید کرد.

۳-۵- تیغه‌های تحریک شده مغناطیسی

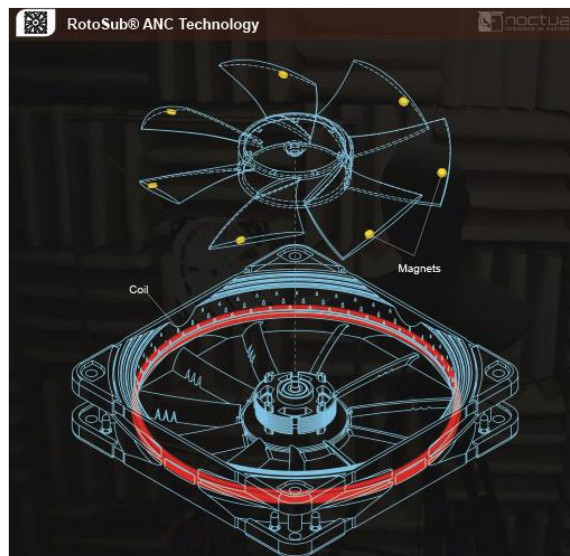
تکنولوژی جالبی توسط شرکت ناکتوا^۱ برای کاهش نویز فن‌های کامپیوتری معرفی و با نامروتوساب^۲ (شکل ۲۳) ثبت شد [۴۰]. اگرچه این روش برای فن‌های خنک‌کننده کامپیوترها استفاده می‌شود، اما می‌توان روش مشابه‌ای را برای پهنادهای کوچک نیز به کار برد. روشن و خاموش کردن جریان الکتریکی سیم پیچ

2. RotoSub® Technology

1. Noctua

۶- نتیجه‌گیری

پهپادها کاربردهای بسیاری دارند که نیازمند استفاده از آن‌ها در محل‌های شهری است که می‌تواند منجر به ناراحتی شود. برای جلوگیری از این موارد می‌توان از استراتژی‌هایی برای کاهش نویز استفاده کرد. روش‌های غیرفعال مزایایی همچون سادگی، اطمینان بالا، هزینه پایین و عدم نیاز به منبع انرژی اضافی دارند. کاهش نویز فرکانس‌های پایین ممکن است فقط به وجود روش‌های فعال که تنها در زمان‌های لازمه همچون بلند شدن و نشستن و پرواز در ارتفاع پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند، داشته باشد. استفاده از هر دو روش فعال و غیرفعال می‌تواند یکی از بهترین روش‌ها برای کاهش نویز باشد. روش‌های گفته شده اگرچه مقدار کمی به تنهایی از نویز تولیدی را کاهش می‌دهند اما با ترکیب آن‌ها با هم می‌توان به هدف‌گذاری انجام شده برای کاهش نویز رسید.



شکل (۲۳): ارتعاش تیغه‌ها در میدان الکترومغناطیسی [۴۰].

۶- مراجع

- [1] B. Vergouw, H. Nagel, G. Bondt, and B. Custers, "Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments," in *The future of drone use*, ed: Springer, 2016, pp. 21-45.
- [2] S. G. Gupta, D. Ghonge, and P. M. Jawandhiya, "Review of unmanned aircraft system (UAS)," *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume*, vol. 2, 2013.
- [3] N. Intaratep, W. N. Alexander, W. J. Devenport, S. M. Grace, and A. Dropkin, "Experimental study of quadcopter acoustics and performance at static thrust conditions," in *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2016, p. 2873.
- [4] F. Christiansen, L. Rojano-Doñate, P. T. Madsen, and L. Bejder, "Noise levels of multi-rotor unmanned aerial vehicles with implications for potential underwater impacts on marine mammals," *Frontiers in Marine Science*, vol. 3, p. 277, 2016.
- [5] D. Raya Islam, A. Stimpson, and M. Cummings, "Small UAV Noise Analysis," *Technical Report* 2017.
- [6] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, *Master handbook of acoustics*: McGraw-Hill Education, 2022.
- [7] H. Leventhall and L. Wong, *A Review of Active Attenuation And Development of an Active Attenuator'Open Refuge': Health & Safety Executive*, 1988.
- [8] S. M. Kuo and D. R. Morgan, "Active noise control: a tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, pp. 943-973, 1999.
- [9] C. H. Hansen, S. D. Snyder, X. Qiu, L. A. Brooks, and D. J. Moreau, *Active control of noise and vibration*: Spon London, 1997.
- [10] C. Griffis, T. Wilson, J. Schneider, and P. Pierpont, "Unmanned aircraft system propulsion systems technology survey," 2009.
- [11] D. CIRIGLIANO, "Engine-type and propulsion-configuration selections for long-duration UAV flights," 2017.
- [12] A. Balachandran, A. Shah, and D. J. Challa, "Propulsion selection and analysis for Unmanned Aerial Vehicles for SAE Aero Design series," *Int. J. Eng. Sci*, vol. 3, pp. 29-35, 2014.
- [13] Š. Riss, "Development of a Hybrid Power Unit for Unmanned Aerial Vehicles," *Master thesis*, Czech Tech. Univ., Prague, 2017.
- [14] D. Miljković, "Active noise control in light aircraft cabin using multichannel coherent method," *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, vol. 57, pp. 1056-1069, 2016.
- [15] (March 2018). Noisetools. Available: <http://noisetools.net>
- [16] B. S. Henderson and D. L. Huff, "Electric Motor Noise Status," in *Acoustics Technical Working Group (ATWG) Meeting*, 2017.
- [17] T. Bertolini and T. Fuchs, "Vibrations and Noises in Small Electric Motors Measurement, Analysis, Interpretation," *Optimization*, Süddeutscher Verlag onpact GmbH, vol. 81677, 2012.
- [18] M. Brackley, "Acoustic noise from small electronically commutated motors," *University of Warwick*, 2001.
- [19] M. Brackley and C. Pollock, "Analysis and reduction of acoustic noise from a brushless DC drive," in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No. 99CH36370)*, 1999, pp. 888-893.
- [20] (March 2018). How to choose motor and propeller for quadcopter? Available: <https://top-10-drones.com/blog/choose-motor-propeller-quadcopter>
- [21] How to choose motor and propeller for quadcopter March 2018. Available: <https://top-10-drones.com/blog/choose-motor-propeller-quadcopter>
- [22] D. Kurtz and J. Marte, "A review of aerodynamic noise from propellers, rotors, and lift fans," 1970.
- [23] *Engineering Acoustics/Noise from cooling fans*, March 2018. Available: https://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Noise_from_cooling_fans#RotorCasing_interaction
- [24] D. Potente, "General design principles for an automotive muffler," in *Proceedings of ACOUSTICS*, 2005, pp. 153-158.
- [25] P. Davies, "Piston engine intake and exhaust system design," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 190, pp. 677-712, 1996.
- [26] *Noise Reduction Chart-Felbridge Flyers RMFC*, March 2018. Available: http://www.flyingsites.co.uk/howto/noise_chart.html
- [27] F. B. Metzger, "An assessment of propeller aircraft noise reduction technology," 1995.

- [28] More on ducted propellers, the Q-tip propeller, March 2018. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=pJEQ4xKFUi4>
- [29] Z. Ning, R. W. Wlezien, and H. Hu, "An experimental study on small UAV propellers with serrated trailing edges," in 47th AIAA fluid dynamics conference, 2017, p. 3813.
- [30] V. Štorch, J. Nožička, M. Brada, J. Gemperle, and J. Suchý, "Measurement of noise and its correlation to performance and geometry of small aircraft propellers," in EPJ Web of Conferences, 2016, p. 02112.
- [31] Aerotestra MK10 ducted multi rotor aircraft, March 2018. Available: <https://aerotestra.com/projectsupdates/2015/2/24/aerotestramk10-ducted-multi-rotor-aircraft>
- [32] J. H. Dittmar, "An estimate of the noise shielding on the fuselage resulting from installing a short duct around an advanced propeller," 1988.
- [33] R. Oleson and H. Patrick, "Small aircraft propeller noise with ducted propeller," in 4th AIAA/CEAS aeroacoustics conference, 1998, p. 2284.
- [34] H. Zhao, Y. Wang, D. Zhao, J. Wen, Y. W. Lam, and O. Umnova, "A low-frequency metasurface absorber based on Helmholtz resonators," ICSV24, London, UK, pp. 23-27, 2017.
- [35] X. Huang, L. Sheng, and Y. Wang, "Propeller synchrophase angle optimization of turboprop-driven aircraft—an experimental investigation," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 136, 2014.
- [36] J. Jones and C. Fuller, "Noise control characteristics of synchrophasing—An experimental investigation, 9th AIAA," in NASA Aeroacoustics Conference, October 1984.
- [37] J. Jones and C. Fuller, "An experimental investigation of the interior noise control effects of propeller synchrophasing," 1986.
- [38] D. Hammond, R. McKinley, and B. Hale, "Noise reduction efforts for special operations c-130 aircraft using active synchrophaser control," AIR FORCE RESEARCH LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH1998.
- [39] G. Chaplin and R. Smith, "Waveform synthesis--The Essex solution to repetitive noise and vibration," 1983.
- [40] Noctua ANC Project, March 2018. Available: https://noctua.at/en/noctua_anc_project