

VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ERKENNUNG VON UNBEMANNTE KLEINSTFLUGZEUGEN IN NIEDRIGER HÖHE

Die Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß des Oberbegriffs des unabhängigen Verfahrensanspruchs und eine Vorrichtung gemäß des Oberbegriffs des unabhängigen Vorrichtungsanspruchs. Insbesondere betrifft die Erfindung eine unter dem Begriff Detektion zusammengefasste Erkennung und Ortung von Kleinstflugzeugen. Die Erfindung kann verwendet werden, um technische Mittel zum Schutz wichtiger Bodenobjekte nach dem Verfahren des Anspruchs 1 [1] zu schaffen.

Die moderne internationale Situation ist durch eine neue Komponente gekennzeichnet, die selbstbewusst ihren Platz in militärischen Konflikten eingenommen hat. Hierbei handelt es sich um Drohnen. Drohnen spielen eine bedeutende Rolle bei Aufklärung, Kampf, Verteidigung und Angriff. Eine große Anzahl staatlicher Unternehmen

und privater Unternehmen beteiligen sich an der Drohnenproduktion. In der Praxis handelt es sich um eine neue Art von Waffe. Die Verteidigung gegen diese Waffen ist eine gewaltige Aufgabe.

Das eigentliche Problem ist jedoch der Schutz vor Mikrodrohnen, da der absolute Entwicklungstrend darin besteht, ihre Größe auf wenige Zentimeter zu minimieren. Ein damit einhergehendes Problem ist, dass solche Mikrodrohnen weniger nur für militärische Konflikte, sondern vielmehr für Zwecke beispiellosen Terrorismus verwendbar sind.

Mikrodrohnen zielen auf Städte und die darin lebenden Menschen ab. Schwärme von Mikrodrohnen werden nicht in Schützengräben fliegen, um Soldaten zu vernichten, sie werden nicht an Feldschlachten teilnehmen, sie werden in Hotels, Häuser, Büros, Schulen und Universitäten fliegen. Wenn Mikrodrohnen in die Hände von Terroristen gelangen würden, würden Städte wie Singapur oder Dubai innerhalb kürzester Zeit verarmen, weil niemand ihre Bewohner schützen würde. Und diejenigen, gegen die Terrorismus und Erpressung eingesetzt werden, werden alles für ihre Kinder geben.

Unter den Bedingungen der Stadtentwicklung – einer überwältigenden Menge an Störungen durch Gebäudestrukturen aus Stahlbeton, Glas, Spiegel, die gesamte städtische Infrastruktur, verschiedene Arten von Industrien, das Leben der Stadt selbst ist die Aufgabe der Erkennung von Mikrodrohnen äußerst schwierig. Was auch immer das Problem ist, das oberste Ziel ist die Erkennung und Identifizierung von Mikrodrohnen mit einer Größe von 1 bis 3 cm in dichten städtischen Umgebungen.

Der Erkennungsprozess umfasst die Verwendung verschiedener aktiver und passiver Sensoren. Ein Merkmal der Erkennung von Mikrodrohnen in dichten städtischen Gebieten ist eine ganze Reihe von Störungen und gleichzeitig kurze Entfernungen zu abschirmenden Hindernissen, Gebäuden und Strukturen. Natürlich ist es unwahrscheinlich, dass klassische Radarerkennungsgeräte und Laser auf die Fenster eines benachbarten Hotels gerichtet werden.

Daher ergibt sich folgende Anforderung – aktives Radar sowie akustische und optische Raumerfassung in unmittelbarer Nähe, die für eine zuverlässige Erkennung von Mikrodrohnen erforderlich sind, müssen eine begrenzte Reichweite in Form von physischen Grenzen haben (und dürfen nicht durch Software gesteuert werden). Diese Anforderung ermöglicht einerseits eine kurze Erfassungsreichweite des Suchobjekts von bis zu etwa 100 m und minimiert andererseits den Einfluss von Störungen, einschließlich der eigenen reflektierten Schallsignale.

Diese schwierige Anforderung soll in der beanspruchten Erfindung durch den Einsatz von aktiven Radar- und Akustiksensoren umgesetzt werden, die im Bereich der resonanten Absorption von Radiowellen in der Atmosphäre (für einen Millimeterwellenradarsensor) und der resonanten Streuung von Akustikwellen auf einem Mikro-UAV (für einen aktiven Akustiksensoren) arbeiten.

Da beispielsweise tatsächlich alle Radarfunktionen in sogenannten „Transparenzfenstern“ ausgeführt werden, stört der Betrieb der überwiegenden Mehrheit der Funkgeräte die in der Erfindung vorgeschlagene Radarerkennung nicht. Gleichzeitig kann die Aufgabe in Opazitätsfenstern gelöst werden, wenn für die Erkennung keine große Entfernung erforderlich ist, d. h. in voller Übereinstimmung mit der Anforderung der Erkennung von Mikrodrohnen in städtischen Gebieten. Die Erkennung von Mikrodrohnen über große Entfernungen ist nicht das beabsichtigte Ziel. Dies ist in der Stadt unmöglich; Mikrodrohnen müssen erkannt werden, möglicherweise im freien Raum „vor dem Nachbarhaus“, normalerweise nicht mehr als hundert Meter.

Gleichzeitig ist es ratsam, für jedes spezifische (geschützte) Objekt die erforderlichen Abstände in Bezug auf die nächstgelegenen städtischen Objekte experimentell zu überprüfen, um die Lösung des Problems der zuverlässigen Erkennung von Mikrodrohnen zu optimieren und Störungen durch benachbarte Gebäude und Strukturen zu minimieren.

Bekannt ist die Verwendung von Radaranlagen zur Erkennung von Flugobjekten. Unbemannte Kleinstflugzeuge (UAV; Unmanned Aerial Vehicles) in geringer Höhe sind

jedoch ein schwieriges Erfassungsziel für bestehende Radaranlagen. Unbemannte Luftfahrzeuge in geringer Höhe haben eine kleine wirksame Streuungsfläche, was auf ihre geringe Größe (einige wenige bis zehn Zentimeter) und die Verwendung von Verbundwerkstoffen mit geringer Reflexion bei ihrer Konstruktion zurückzuführen ist. Darüber hinaus sind aktive (strahlende) Radarstationen gegnerischen elektronischen Kriegsführungssystemen ausgesetzt. All dies mindert ihre Wirksamkeit aufgrund der geringen Reichweite und der geringen Zuverlässigkeit der Erkennung von unbemannten Kleinstflugzeugen in niedriger Höhe in der elektronischen Kriegsführung [2].

Der beanspruchten Erfindung am nächsten kommt ein passives akustisches Verfahren zur auch als Detektion oder Erfassung bezeichneten Erkennung unbemannter Luftfahrzeuge [3]. Das akustische Aufklärungsmodul von Ataka-Shoroh ist beispielsweise in der Lage, ein sich näherndes unbemanntes Luftfahrzeug in einer Entfernung von zehn bis hunderten von Metern zu erkennen, je nach dem Pegel des Außenlärms und der Größe der Propeller der Drohne.

Der Nachteil dieser Methode ist deren Störanfälligkeit durch externe akustische Geräusche, kurz Fremdgeräusche. Deren Auswirkungen verringern den Erfassungsbereich von unbemannten Flugzeugen. Auch falsche, positive Ergebnisse sind möglich.

Durch US 2015/0302858 A1 ist bekannt, mittels eines oder mehrerer Mikrofone kurze Sequenzen akustischer Geräusche aufzuzeichnen und jede dieser Sequenzen in ihr Frequenzspektrum zu zerlegen. Das Frequenzspektrum wird mit in einer Datenbank gespeicherten Geräuschsignaturen verschiedener UAVs in unterschiedlichen Flugsituationen (Schwebeflug, Aufstieg, Abstieg, Annäherung, Entfernung) verglichen, um ein UAV zu identifizieren. Bei Übereinstimmung erfolgt ein Alarm. Der Alarm kann eine Information über das UAV-Modell umfassen. Die Verwendung mehrerer Mikrofone erlaubt eine Richtungsdetektion des UAV.

Durch US 2021/0383665 A1 ist eine Kombination von akustischer mit elektro-optischer Detektion zur Erfassung von UAVs bekannt. Die UAVs können nach Typ und Bedrohungsgrad klassifiziert werden. Hierbei werden akustische Sensoren in einer an ein Gelände, Geländemerkmale oder menschengemachte Objekte angepassten

Aufstellung angeordnet. Ein von einem oder mehreren der akustischen Sensoren erfasstes Geräusch wird mit bekannten Geräuschsignaturen verglichen, um die Quelle des Geräuschs einzuordnen. Die Geräuschsignaturen umfassen für UAVs bezeichnende Informationen. Die akustische Detektion kann mit optischen Bild-, optischen Video-, Wärmebild-, elektro-optischen Infrarot-, Funkfrequenzerfassungsmitteln, RADAR, LIDAR sowie einer Erfassung der elektromagnetischen Strahlung über das gesamte Spektrum hinweg einhergehen, einschließlich beliebiger Kombinationen hieraus, beispielsweise um ein Videobild oder eine 3D-Visualisierung eines Sichtbereichs anzuzeigen, in dem die nicht auf eine Sichtlinie angewiesene akustische Detektion ein UAV als Geräuschquelle angibt.

Die technische Aufgabe der Erfindung ist die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Erfassung und die Vergrößerung des Erfassungsbereichs von unbemannten Kleinflugzeugen mit rotierenden Propellern (Motoren) in geringer Höhe bei Vorhandensein von Fremdgeräuschen.

Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung, die Erkennungseffizienz von Mikro-UAVs in geringer Höhe in städtischen Gebieten zu erhöhen, indem die Zuverlässigkeit der Erkennung und die Geheimhaltung des Betriebs bei externen Störungen erhöht werden.

Die Aufgabe wird gelöst sowohl durch die Merkmale des unabhängigen Verfahrensanspruchs, als auch durch die Merkmale des unabhängigen Vorrichtungsanspruchs.

Es ist ersichtlich, dass die Erfindung wie folgt verwirklicht sein kann. Um in geringer Höhe fliegende Mikro-Drohnen (UAVs) zu erkennen, werden ihre akustischen Signale aufgezeichnet, die durch mechanische Vibrationen von (ihren) Elektromotoren und die Drehung von (ihren) Propellern verursacht werden. Gleichzeitig wird das Auftreten einer parametrischen Modulation des optischen Signals, die durch dieselben mechanischen Vibrationen verursacht wird, sowohl im sichtbaren ($0,4 \dots 0,76 \mu\text{m}$) als auch im infraroten ($0,76 \mu\text{m} \dots 1 \text{ mm}$) Bereich der vom UAV reflektierten Wellen

aufgezeichnet, während die Korrelation zwischen diesen beiden Niederfrequenzsignalen registriert wird (deren Vorhandensein die Erkennung eines UAV anzeigt).

Die Detektion eines Flugobjekts erfolgt durch die Verwendung mindestens zweier unabhängiger Suchkanäle (Sensoren):

- mindestens ein passiver, optischer Kanal, der die sichtbaren (z.B. 0,4 ... 0,76 Mikrometer) Wellenlängen nutzt, und/oder
- mindestens ein passiver, optischer Kanal, der die infraroten (z.B. 0,76 Mikrometer ... 1 mm) Wellenlängen nutzt,
- mindestens ein passiver, akustischer Kanal, der den vom menschlichen Ohr wahrnehmbaren Frequenzbereich (z.B. 10Hz ... 20kHz) sowie gegebenenfalls angrenzende Frequenzbereiche (z.B. 3Hz ... 10Hz; 20kHz ... 30kHz) nutzt,

sowie gegebenenfalls zusätzlich

- mindestens ein aktiver Radar-Kanal im Millimeter-Wellenlängenbereich, kurz Millimeter-Erfassungsbereich, und/oder
- mindestens ein aktiver akustischer Kanal,

beispielsweise durch eine Verwendung von drei Suchkanälen (Sensoren).

Aktive akustische Kanäle, die bei der Wellenlänge der Resonanzstreuung akustischer Wellen an unbemannten Luftfahrzeugen arbeiten, werden vorzugsweise in den Erfassungsprozess einbezogen; aktive Radarkanäle des Millimeter-Erfassungsbereichs, deren Wellenlänge mit der Wellenlänge der Resonanzabsorption des Signals in der Atmosphäre übereinstimmt, werden vorzugsweise in den Erfassungsprozess einbezogen.

Es ist ersichtlich, dass zur Lösung der der Erfindung zu Grunde liegenden Aufgabe vorgesehen sein kann, aktive Radar- und Akustiksensoren zu verwenden, die in den Fenstern der Resonanzabsorption (für einen Millimeterwellenradarsensor) und der Resonanzstreuung von Schallwellen auf einem Mikro-UAV für einen aktiven Akustiksensoren arbeiten, sowie optische Sensoren, die im sichtbaren und IR-Bereich arbeiten.

Die Wellenlänge der Resonanzabsorption in der Atmosphäre wurden von Referenzdaten zur Ausbreitung von Radiowellen in verschiedenen Medien (Gase, Flüssigkeiten, Feststoffe usw.) aus bekannten Literaturquellen entnommen.

Der erwähnte passive optische Sensor arbeitet mit einem passiven akustischen Sensor zusammen.

Es ist bekannt, dass ein moderner passiver optischer Sensor unter günstigen Bedingungen in der Lage ist, ein unbemanntes Mikro-Luftfahrzeug in niedriger Höhe tagsüber in einer Entfernung von 500 Metern zu erkennen [4]. Bei Nacht beträgt die Erfassungsreichweite mit einer Infrarot-Wärmebildkamera Dutzende oder sogar Hunderte von Metern [2]. Die Verwendung von nur einem optischen Kanal macht den Erkennungsprozess jedoch instabil.

Insbesondere in den passiven Detektionskanälen, dem passiven optischen und dem passiven akustischen, vorzugsweise in beiden Detektionskanälen (akustisch und optisch) werden niederfrequente Modulationskomponenten registriert, die von den mechanischen Schwingungen beziehungsweise Vibrationen von Elektromotoren und rotierenden Propellern tieffliegender UAVs verursacht werden. Gleichzeitig gibt es eine feste und stabile Korrelation zwischen den beiden Komponenten. Die Koinzidenz der niedrigen Frequenzen ist auf die Anzahl der Umdrehungen der rotierenden Schrauben zurückzuführen, die eine niederfrequente parametrische "spiralförmige" Modulation des optischen Signals erzeugen [5]. Die Nutzung der Korrelation erhöht die Reichweite und die Rauschunempfindlichkeit des Detektionsverfahrens erheblich. Niederfrequent kann hierbei Veränderungen in einem Signal in einem Bereich von 20 Hz bis 20kHz bezeichnen.

In dem beanspruchten Verfahren ist zusätzlich ein aktiver Millimeterwellen-Radarsensor enthalten, dessen Wellenlänge vorzugsweise mit der Wellenlänge der Resonanzabsorption des Signals in der Atmosphäre (1 ... 15 mm) in einem gegebenen Höhenbereich unbemannter Luftfahrzeuge übereinstimmt. Die größte Dämpfung in der Atmosphäre erfahren die Millimeterwellen-Funkwellen. Dies liegt daran, dass es im Millimeterbereich Absorptionslinien durch die in der Atmosphäre enthaltenen

Sauerstoff- und Wasserdampfmoleküle gibt. Der Absorptionsprozess ist auf resonante quantenmechanische Effekte zurückzuführen.

Das Wasserdampfmolekül hat ein konstantes elektrisches Moment, dessen Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld die Resonanzabsorption von Radiowellen bewirkt. Die maximale Absorption ist im Bereich von 10 ... 15 mm, sowie bei Wellenlängen kürzer als 3 mm.

Das in der Atmosphäre enthaltene Sauerstoffmolekül hat ein magnetisches Dipolmoment, das das Auftreten einer einzelnen Absorptionslinie bei einer Wellenlänge von 2,5 mm und eines Linienkomplexes (Bursts) bei 5 mm verursacht.

Die Verwendung von Wellenlängen mit Resonanzabsorption in der Atmosphäre (Dämpfungskoeffizient erreicht 20...30 dB/km oder mehr) des aktiven Radar-Kanals (Radarsensors) erhöht die Geheimhaltung der Funktion des Radarsensors [7]. Darüber hinaus ist bei diesen Wellenlängen im Millimeterbereich der Grad der Störung deutlich geringer, da sie in verschiedenen elektronischen Systemen wenig genutzt werden. Der Radarsensor registriert die reflektierten Mikrowellensignale nur in einem bestimmten Höhenbereich des unbemannten Luftfahrzeugs, d. h. in kurzen Abständen (einige zehn Meter). Dadurch werden Störungen durch große Flugobjekte (Flugzeuge, Hubschrauber), die sich in großer Entfernung befinden, vermieden.

Vorzugsweise ist zusätzlich ein aktiver akustischer Sensor enthalten, der bei Wellenlängen arbeitet, bei denen akustische Wellen an unbemannten Luftfahrzeugen in Resonanz gestreut werden. [8]. Da die Mindestabmessungen (Mikro) in Zentimeteinheiten angegeben sind, müssen die Wellenlängen des akustischen Feldes diesen entsprechen, um eine Resonanzstreuung zu gewährleisten. Angesichts der Schallgeschwindigkeit in der Luft (ca. 340 m/s) entspricht dies Frequenzen von einigen zehn kHz. Dementsprechend liegt der optimale Frequenzbereich eines aktiven akustischen Sensors bei Entfernungen bis zu 50 Metern bei 10...20 kHz. In diesem Fall liegt der Dämpfungskoeffizient bei einem akzeptablen Wert von 0,2...0,8 dB/m. Der Gesamtverlust auf einer Strecke von 100 Metern beträgt nur 20-80 dB, was für einen

akustischen Sensor innerhalb vertretbarer Grenzen ist. Gleichzeitig wird der Wert des akustischen Sondierungssignals in einer Entfernung von 100 Metern oder mehr unbedeutend sein, was es dem "Feind" erschwert, es zu registrieren.

Wie ein Resonanzstreuungssignal berechnet werden kann, ist dem Fachmann hinlänglich bekannt.

Ähnlich wie beim klassischen Radar hat auch in der Akustik die effektive Streufläche von Objekten (Mikrodrohnen, UAVs) 3 charakteristische Wellenstreubereiche:

- Rayleigh, wenn die Wellenlänge viel größer ist (mindestens 2-3 mal) als die charakteristische Größe des Objekts;
- Resonant, wenn die Wellenlänge der Größe des Objekts entspricht (in unserem Fall);
- Quasi-optisch, wenn die Wellenlänge des akustischen Feldes viel kleiner (mindestens 2-3 mal) als die charakteristische Größe des Objekts ist.

Die Berechnung der Reflexionseigenschaften von realen Drohnen mit komplexer Form ist eine Herausforderung. Daher wird eine Näherung verwendet, die auch erfindungsgemäß umgesetzt werden kann. Dabei handelt es sich jedoch um vorbereitende Schritte, die nicht notwendigerweise während des erfindungsgemäßen Erkennungsverfahrens erfolgen, sondern aus einer vorcodierten Datenbank für die Reichweite verschiedener Flugobjekte unterschiedlicher Größe und/oder Form entnommen werden können.

Bei der Auswertung von Drohnen ist es möglich, die Drohnen durch eine Kugel zu ersetzen, deren Durchmesser der Länge des Rumpfes der Drohnen entspricht. In diesem Fall liegt der Wert der akustisch wirksamen Streufläche ("Kraftziel") nahe dem Wert der transversalen Streufläche der Kugel. Die charakteristischen Resonanzabweichungen der Reflexionseigenschaften der Kugel betragen nicht weniger als 3....5 dB. Bei einem Objektdurchmesser von z.B. 3 cm (Mikrodrohne) liegt der resonante Streubereich (Wellenlänge von ca. 3 cm) im Bereich von 10 kHz.

Von den drei typischen charakteristischen Bereichen der Schallwellenstreuung gibt es in unserem Fall vorzugsweise einen Resonanzbereich, in dem die Wellenlänge der Größe des Objekts entspricht, d. h. in dem die Reflexion maximal ist.

Da wir vorzugsweise auch die Erkennung von Mikrodrohnen mit einer Größe von 3 Zentimetern in Betracht ziehen, wird die Wellenlänge ebenfalls etwa 3 Zentimeter betragen. Die entsprechende Frequenz, nach der Formel:

$$F \text{ (Hz)} = V \text{ (Schall)} / \lambda \text{ (Wellenlänge)} = 340 \text{ (m/s)} / 3 \times 10^{-2} \text{ (m)} \approx 11 \text{ (kHz)},$$
 und liegt im Bereich 10 ... 20 (kHz).

Soll z.B. eine 2 cm große Mikrodrohne detektiert werden, so beträgt die Länge der akustischen Welle entsprechend der charakteristischen Resonanzstreuung ebenfalls ca. 2 cm, bzw. die Frequenz ≈ 17 kHz. Es kann ein Abtastvorgang erfolgen, bei dem die Frequenzen so lange verändert werden, bis die richtige Frequenz für die richtige Mikrodrohne durch die entsprechende Detektion der Resonanzstreuung erkannt wird.

Die bevorzugte gleichzeitige Verwendung von vier Sensoren mit optimaler Signalverarbeitung (Korrelation für die ersten beiden Sensoren) und einer gemeinsamen Koinzidenzschaltung für alle vier Sensoren ermöglicht es, die Zuverlässigkeit der Erkennung unbemannter Luftfahrzeuge unter dem Einfluss akustischer, optischer und elektromagnetischer Mikrowellenstörungen zu erhöhen.

Um eine in diesem Dokument auch als Geheimnis oder Geheimhaltung des Betriebs bezeichnete Ausführung des Verfahrens beziehungsweise eines Betriebs einer das Verfahren ausführenden Vorrichtung insbesondere vor einer Fremderfassung zu tarnen, zu verstecken oder zu verheimlichen und den Energieverbrauch zu senken, erfolgt die aktive Radar- und Akustikerkennung bei eingeschaltetem Steuersignal eines zusätzlichen passiven Akustikkanals, der im Standby-Modus arbeitet.

Um die Leistung der komplexesten Komponente der vorgeschlagenen Methode zu testen, wurde ein Experiment im Feld durchgeführt. Das Objekt der Suche war ein kleiner MJX Bugs 3 Quadcopter, der mit geräuscharmen bürstenlosen Propellern

ausgestattet ist. Sein Gewicht beträgt 447 Gramm, die Gesamtabmessungen 44x44x15 Zentimeter. Der Quadcopter war auf einem Stativ in 15 Metern Entfernung vom Shure SM58 Mikrofon und dem optischen Sensor befestigt. Als optischer Sensor wurde ein 12x-Monokular mit einer FD-7k-Silizium-Fotodiode verwendet, das auf einem vibrationsfesten Stativ montiert war. Die Fotodiode wurde auf einen breitbandigen Niederfrequenz-Anpassungsverstärker geladen. Die Fotodiode arbeitete im sichtbaren Bereich und im nahen Infrarot ($\lambda_p = 0,4 \dots 1,1 \mu\text{m}$).

Das niederfrequente Spektrum des Mikrofons und des optischen Sensors wurde mit einem Spektrumanalysator S-48 aufgezeichnet. Betriebsart - "Schmalband", Bandbreite 5 Hz.

Während der Messungen variierte die Drehfrequenz der Zweiblatt-Propeller des Quadcopters von 6000 bis 9000 U/min. In diesem Fall wurde ein niederfrequentes Spektrum aufgezeichnet (Grundfrequenz F und ihre Oberwellen), es lag im Frequenzband ab 200 Hz und höher, dies entspricht der bekannten Abhängigkeit [6]:

$$F = \frac{\omega N}{60}, \text{ Hz,}$$

wobei ω die Propellerdrehzahl,
rpm, ist

N - Anzahl der Blätter.

Es wurde experimentell festgestellt, dass die Komponenten des Spektrums des akustischen Signals und des niederfrequenten Signals am Ausgang des optischen Sensors mit einer Genauigkeit von 3-5 % übereinstimmen. Dies ermöglicht die Erkennung von Signalen von unbemannten Flugzeugen in geringer Höhe und von Mikroflugzeugen vor dem Hintergrund des akustischen Lärms - unter Verwendung eines Korrelators.

Fig. 1 zeigt ein Blockdiagramm einer Vorrichtung (1), die das vorgeschlagene Verfahren zur Erkennung von unbemannten Kleinstflugzeugen in geringer Höhe implementiert.

Die Vorrichtung zur Detektion von unbemannten Kleinstflugzeugen im Tiefflug kann einen passiven akustischen Sensor (2), einen passiven optischen Sensor (Empfänger von modulierter optischer Strahlung im sichtbaren und infraroten Bereich (4), ein Korrelometer (3), vorzugsweise einen aktiven akustischen Sensor (5), vorzugsweise einen aktiven Radarsensor (6). Vorzugsweise ist eine Koinzidenzschaltung (mit Aktor) (7) enthalten. Das Korrelometer (3) ist zur Erfassung der Korrelationsbeziehung von Signalen aus den Ausgängen passiver akustischer und optischer Sensoren vorgesehen.

Die Vorrichtung (1) zur Erkennung von unbemannten Kleinstflugzeugen in geringer Höhe funktioniert gemäß einer nicht einschränkenden Ausführungsform wie folgt. Ein akustisches Signal von einem unbemannten Mikroflugzeug in geringer Höhe wird von einem passiven akustischen Sensor (2) empfangen. In diesem Fall wird gleichzeitig ein moduliertes optisches Signal von einem unbemannten Luftfahrzeug mit einem optischen Sensor (4) aufgenommen. Niederfrequente Signale der Ausgänge der beiden Sensoren werden den Eingängen des Korrelometers (3) zugeführt. Ihre Spektren stimmen überein, da sie von denselben rotierenden Propellern erzeugt werden. In diesem Fall wird das Signal in die Koinzidenzschaltung (7) eingespeist, die Signale der beiden aktiven Sensoren, akustischen (5) und des Radars (6) gelangen ebenfalls in die Koinzidenzschaltung. Anschließend kann der Aktor ausgelöst werden. Der Aktuator ist vorzugsweise als Zusatz zu dem erfindungsgemäßen Detektionsverfahren zu verstehen und wird für die Detektion selbst nicht benötigt.

Wichtig ist hervorzuheben, dass die Erfindung ein Verfahren zur Detektion von unbemannten Kleinstflugzeugen (UAV) in geringer Höhe umfasst, einschließlich der Aufzeichnung ihrer durch mechanische Vibrationen von Elektromotoren und die Drehung von Propellern verursachten akustischen Signale, welches Verfahren dadurch gekennzeichnet ist, dass:

- zusätzlich ein optisches Signal jeweils im sichtbaren ($0,4 \dots 0,76 \mu\text{m}$) und/oder infraroten ($0,76 \mu\text{m} \dots 1 \text{ mm}$) Bereich der UAVs aufgezeichnet wird,
- das Auftreten einer durch diese gleichen mechanischen Vibrationen verursachten parametrischen Modulation des optischen Signals erfasst wird,

wobei eine Korrelation von akustischen und optischen Signalen des UAVs registriert wird, deren Vorhandensein die Erkennung der UAV anzeigt.

Die Korrelation kann in einem durch die mechanischen Vibrationen von Elektromotoren und die Drehung von Propellern von UAVs verursachten (Nieder-)Frequenzbereich erfolgen.

Die Erfindung schlägt demnach vor, die Korrelation zweier niederfrequenter harmonischer Signale auf der Grundlage eines bekannten, gut entwickelten mathematischen Apparats zu verwenden, der eine einfache spezifische Formel für den Korrelationskoeffizienten enthält. Der Ausdruck niederfrequent bezieht sich dabei auf einen mechanische Vibrationen von Elektromotoren von UAVs umfassenden und durch die Drehung deren Propeller verursachten Frequenzbereich. Hierzu kann ein direkter mathematischer Ausdruck verwendet werden, der die spezifische Physik des Prozesses beschreibt, ohne komplexe statistische Methoden zu verwenden. Dies hilft dabei, technische Proben mit besserer Empfindlichkeit und besserer Selektivität zu erstellen, was ein klarer Vorteil ist.

Zusätzlich kann das Verfahren eine aktive Radarerfassung im Millimeterbereich vorsehen, deren Wellenlänge mit der Wellenlänge einer Resonanzabsorption in der Atmosphäre, die von der Oberfläche der Drohne (micro UAV electromagnetic waves) reflektiert werden, übereinstimmt, vorzugsweise im Bereich von 1 mm bis 15 mm, besonders bevorzugt innerhalb eines gegebenen (Flug-)Höhenbereichs von Drohnen, vorzugsweise zwischen 5 m und 50 m.

Die Besonderheit dieser Ausgestaltung besteht darin, dass die aktive Radarerkennung in Bezug auf Mikrodrohnen mit einer Größe von 1 bis 3 cm in städtischen Gebieten durchgeführt wird. Basierend auf dieser Anforderung muss ein aktiver

Radarsensor den Raum in einer Entfernung von vorzugsweise bis zu 100 m untersuchen, während das Sondierungssignal bei größerer Entfernung erheblich schwächer werden muss, damit das reflektierte Signal von umliegenden Gebäuden und Strukturen den Radarempfängersensor nicht stört. Ein weiterer wichtiger Zweck dieser Dämpfung, die den Abstand zu einer bestimmten Erkennungslinie (~ 100 m) überschreitet, besteht darin, eine zusätzliche Geheimhaltung des Sondierungssignals vor dem „Feind“ zu erreichen. Als Methode (Anspruch 2) zur Lösung des Problems schlug die beanspruchte Erfindung eine aktive Radarerkennung im Millimeterbereich vor, deren Wellenlänge mit dem Bereich der resonanten Absorption von Radiowellen in der Atmosphäre übereinstimmt, die von der Oberfläche von Mikro-UAVs reflektiert werden (im Bereich von 1 mm bis 15 mm). Die Maskierungseigenschaften der Atmosphäre für das Sondierungssignal in diesem Radiowellenbereich sind in unserem Fall am besten geeignet. Dies liegt daran, dass es im Millimeterbereich Absorptionslinien von Sauerstoffmolekülen und Wasserdampf in der Atmosphäre gibt. Der Absorptionsprozess wird durch resonante quantenmechanische Effekte verursacht. Die Verwendung von resonanten Absorptionswellenlängen in der Atmosphäre (der Dämpfungskoeffizient erreicht 20...30 dB/km oder mehr) erhöht die Geheimhaltung des Radarsensors. Darüber hinaus werden die Interferenzpegel bei diesen Millimeterwellenlängen erheblich reduziert, da sie in verschiedenen elektronischen Systemen kaum verwendet werden. Der Radarsensor registriert reflektierte Mikrowellensignale nur in einem bestimmten Höhenbereich des unbemannten Luftfahrzeugs, d. h. auf kurze Entfernungen (zehn Meter). Dadurch werden Störungen durch große Flugobjekte (Flugzeuge, Hubschrauber) in großer Entfernung eliminiert.

Sich hierdurch ergebende Vorteile sind eine Minimierung von Störungen und der Erhöhung der Geheimhaltung bei der Implementierung der aktiven Radarerkennung von Mikrodrohnen mit einer Größe von 1...3 cm in dichten städtischen Gebieten.

Eine vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens kann vorsehen, dass es zusätzlich eine aktive akustische Detektion umfasst, die bei einer Wellenlänge der

Resonanzstreuung von akustischen Wellen an unbemannten Luftfahrzeugen im Frequenzbereich von 10 kHz...20 kHz arbeitet.

Da die Mindestabmessungen von auch als Mikrodrohnen bezeichneten UAVs einige Zentimeter betragen, müssen die Wellenlängen des Schallfelds diesen entsprechen, um eine resonante Streuung zu gewährleisten. In Anbetracht der Schallgeschwindigkeit in der Luft (ca. 340 m/s) entspricht dies Frequenzen von einigen zehn kHz. Dem entsprechend beträgt der optimale Frequenzbereich eines aktiven Akustiksensors bei Entfernungen bis zu 100 Metern 10...20 kHz. In diesem Fall hat der Dämpfungskoeffizient einen akzeptablen Wert von 0,2...0,8 dB/m. Der Gesamtverlust auf einer Strecke von 100 Metern liegt zwischen 20 und 80 dB, was für einen aktiven Akustiksensoren innerhalb akzeptabler Grenzen liegt.

Der Vorteil besteht darin, dass dadurch alle Arten von Störungen in städtischen Umgebungen erheblich reduziert werden können. Gleichzeitig ist die Stärke des akustischen Sondierungssignals in einer Entfernung von 100 Metern oder mehr unbedeutend, was es für den „Feind“ schwierig macht, es zu registrieren.

In diesem Fall überschreitet die effektive Erkennung von Mikrodrohnen nicht mehrere Dutzend Meter, während sie eine minimale Menge an akustischen Störungen „aufnimmt“ und vor dem „Feind“ verborgen bleibt. Dies ist sicherlich ein erheblicher Vorteil für die spezifischen Anforderungen an die aktive akustische Erkennung von Mikrodrohnen mit einer Größe von 1 bis 3 cm in einer Entfernung von bis zu 100 m in einem bestimmten UAV-Höhenbereich, vorzugsweise von 5 m bis 50 m.

Ebenfalls wichtig ist hervorzuheben, dass die Erfindung alternativ oder zusätzlich eine Vorrichtung (1) zur Detektion von UAVs im Tiefflug umfasst. Die Vorrichtung (1) umfasst:

- einen passiven akustischen Sensor (2),
- einen passiven optischen Sensor (4), und
- ein Korrelometer (3).

Das Korrelogramm (3) dient vorteilhaft zur Korrelation von akustischen und optischen Signalen hinsichtlich einer durch mechanische Vibrationen von Elektromotoren und die Drehung von Propellern eines UAV verursachten parametrischen Modulation, deren Vorhandensein die Erkennung eines UAV anzeigt.

Die Vorrichtung (1) erlaubt die Ausführung eines die Erfindung verwirklichenden Verfahrens.

Darüber hinaus kann die Vorrichtung (1) einen aktiven akustischen Sensor (5) umfassen, der so eingestellt ist, dass er bei einer Wellenlänge der Resonanzstreuung von akustischen Wellen an unbemannten Flugzeugen im Frequenzbereich von 10...20 kHz arbeitet.

Alternativ oder zusätzlich kann die Vorrichtung einen aktiven Radarsensor (7) umfassen. Der aktive Radarsensor (7) ist vorteilhaft so eingestellt, dass er mit einer Wellenlänge arbeitet, die einer Resonanzabsorption des Signals in der Atmosphäre im Bereich (1mm...15 mm) übereinstimmt. Der aktive Radarsensor erfasst UAVs in Flughöhen von 5m...50 m.

Die Vorrichtung (1) kann ferner eine Koinzidenzschaltung (7) umfassen, deren drei Eingänge mit den Ausgängen des Korrelogramms und des aktiven akustischen Sensors (5) und des Radarsensors (6) verbunden sind.

Vorteilhaft wird der passive Akustiksensord als Breitbandsensord mit erhöhter Empfindlichkeit ausgewählt, der vorzugsweise im Standby-Modus arbeitet. Wenn er ein Signal empfängt, vermutlich von einem Mikro-UAV, kann er die Aktivierung aktiver Radar- und Akustiksensoren steuern.

Gleichzeitig schaffen aktive Sensoren durch Ausnutzung der absorbierenden (tarnenden beziehungsweise maskierenden) Eigenschaften der Atmosphäre im optimalen Bereich von Radio- und Akustikwellenlängen, vorzugsweise unter Verwendung von Puls- oder FM-Modulation, eine Erkennungszone für Mikrodrohnen in Form einer „Sicherheitshülle“, die ein Objekt abdeckt (das das Ziel von Mikrodrohnenangriffen sein

kann), da sie über eine festgelegte begrenzte Erkennungsreichweite verfügen – vorzugsweise bis zu 100 m –, während sie minimalen Störungen ausgesetzt sind und zusätzliche Geheimhaltung für aktive Akustik- und Radarsensoren (in städtischen Gebieten) bieten.

Für die Vorrichtung werden vorteilhaft aktive Radar- und Akustiksensoren ausgewählt, die unter Ausnutzung der absorbierenden (tarnenden beziehungsweise maskierenden) Eigenschaften der Atmosphäre im optimalen Bereich von Radio- und Akustikwellenlängen arbeiten, vorzugsweise unter Verwendung von Puls- oder FM-Modulation. Sie schaffen eine Erkennungszone für Mikrodrohnen in Form einer „radioakustischen Sicherheitshülle“ mit bestimmten physikalischen und geometrischen Eigenschaften, die ein Objekt abdeckt (das das Ziel eines Angriffs durch Mikrodrohnen sein kann), da sie eine bestimmte begrenzte Erkennungsreichweite haben – vorzugsweise bis zu 100 m in einem bestimmten Höhenbereich von 5 bis 50 m.

Bevorzugt kann es vorgesehen sein, dass das akustische Signal des unbemannten Mikroflugzeugs in geringer Höhe vom passiven akustischen Sensor (2) empfangen wird, wobei, bevorzugt gleichzeitig, das modulierte optische Signal des unbemannten Luftfahrzeugs durch den optischen Sensor (4) erfasst wird.

Bevorzugt werden die niederfrequenten Signale der Ausgänge beider Sensoren den Eingängen des Korrelometers (3) zugeführt, wobei vom Ausgang des Korrelometers (7) das Signal an den Eingang der Koinzidenz-Fixierungsschaltung (7) geleitet werden kann. Optional, bevorzugt gleichzeitig, können andere Eingänge der Koinzidenz-fixierungsschaltung (7) mit Signalen des aktiven akustischen Sensors (5) und des Radarsensors (Radar) (6) versorgt werden. (Fig. 2)

Gleichzeitig unterliegen sie nur minimaler Radar- und Akustikstörungen und bieten zusätzliche Geheimhaltung von Quellen von Sondierungssignalen in dichten städtischen Gebieten – was ein klarer Vorteil gegenüber Geräten (Geräteelementen) zur Erkennung von UAVs auf den vorgestellten Technologieniveaus ist.

Wichtig ist hervorzuheben, dass die Erfindung eine Korrelation zweier niederfrequenter harmonischer Signale vorsieht. Sie kann eine Mustererkennung in einem durch mechanische Vibrationen von Elektromotoren und die Drehung von Propellern von UAVs verursachten (Nieder-) Frequenzbereich sowohl in einem akustischen, als auch in einem optischen, beispielsweise dem vom menschlichen Auge sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums, und/oder infraroten Bereich umfassen. Alternativ oder zusätzlich kann ein Radarsignal, beispielsweise ein im Millimeterwellenlängenbereich liegendes Radarsignal auf einen solchen durch mechanische Vibrationen von Elektromotoren und die Drehung von Propellern von UAVs verursachten (Nieder-) Frequenzbereich untersucht werden, um die Erfassungssicherheit von UAVs zu erhöhen.

Wichtig ist hervorzuheben, dass die Erfindung zur Erfassung von so genannten Mikrodrohnen geeignet ist. Die Abmessungen der Mikrodrohne als Suchobjekt betragen 1...3 cm.

Vorteilhaft unterliegt die Erfassung Beschränkungen bei der Erkennung - Entfernung bis zu 100 m, Bereich der angegebenen Höhen 5...50 m.

Vorteilhaft liegt die aktive Radarerkennungswellenlänge entsprechend dem Bereich der resonanten Absorption von Radiowellen in der Atmosphäre zwischen 1 mm...15 mm.

Der Frequenzbereich der aktiven akustischen Erkennung (Arbeiten bei der Wellenlänge der Resonanz-Streuung (resonant scattering) von Schallwellen in der Atmosphäre) liegt vorteilhaft zwischen 10 kHz...20 kHz.

Vorteile der Erfindung sind unter anderem eine Geheimhaltung der Quellen von Sondierungssignalen, einhergehend mit der Schaffung einer radioakustischen Sicherheitshülle. Dabei handelt es sich um taktische und technische Eigenschaften, die unvergleichliche Vorteile bieten, wenn aktive Radar- und Akustiksensoren zur Erkennung von Mikrodrohnen eingesetzt werden.

Für die Vorrichtung (1) können aktive Radar- und Akustiksensoren Verwendung finden, die unter Ausnutzung der absorbierenden (maskierenden) Eigenschaften der Atmosphäre im optimalen Bereich von Radio- und Akustikwellenlängen arbeiten, vorzugsweise unter Verwendung von Puls- oder FM-Modulation. Sie erzeugen eine Detektionszone für Mikrodrohnen in Form einer „radioakustischen Sicherheitshülle“ mit festgelegten physikalischen und geometrischen Eigenschaften, die ein Objekt (das Ziel eines Angriffs durch Mikrodrohnen sein kann) abdeckt, da sie eine festgelegte begrenzte Detektionsreichweite haben – vorzugsweise bis zu 100 m in einem vorgegebenen Höhenbereich von 5 bis 50 m.

Gleichzeitig sind sie nur minimal Radar- und akustischen Störungen ausgesetzt und bieten zusätzliche Geheimhaltung von Quellen von Sondierungssignalen in dichten städtischen Gebieten – was einen klaren Vorteil gegenüber UAV-Detektionsgeräten (-elementen) auf dem vorgestellten Technologieniveau darstellt.

Informationsquellen

1. Shcherbakov G. N., Shlykov Yu. A. Schutz wichtiger Bodeneinrichtungen vor Luftterrorismus. Spezielle Ausrüstung. 2007. No. 1. p. 17-22.
2. Filin E. D., Kirichek R. V. Methoden zur Erkennung kleiner unbemannter Luftfahrzeuge auf der Grundlage der Analyse des elektromagnetischen Spektrums. Russian drones. 2018. Electronic resource . Accessmode: <https://russiandrone.ru/publications/methody-obnaruzheniya-malorazmer-nykh-bespi-lotnykh-letatelnykh-apparatov-na-osnove-analiza-elektromagn/>.
3. Rostec präsentierte Ausrüstung zum Aufspüren von Spionagedrohnen. Rostec. 2020. Elektronische Ressource. Zugriffsmodus: <https://rostec.ru/news/rostekh-predstavil-apparaturu-dlya-obnaruzheniya-dronov-shpionov/>.
4. UAV-Erkennung durch optische Ortung. optische Ortung. LLC "LAMET" Elektronische Ressourcen. Zugriffsmodus: <http://www.lamet.ru/4988184368>.
5. Shcherbakov G. N. Parametrische Ortung - eine neue Methode zur Erkennung versteckter Objekte. Spezielle Ausrüstung. 2000. No. 4. p. 52-58.
6. V. S. Frantskevich und A. S. Dorogokupets, Study of the acoustic characteristics of a radial fan. Proceedings of BSTU, 2017, series 2, no. 2, p. 215-219. Elektronische Ressource. Accessmode: https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/23346/1/Franckevich_Akustich_harakterist_iki.pdf.
7. Yakovlev O.I. etc. Ausbreitung von Radiowellen. Kapitel 10. Ausbreitung von Funkwellen
Wellen durch absorbierende Medien. Klausel 10.5. Absorption von Millimeter-Radiowellen in der Atmosphäre. "LENARD", Moskau, 2009, S. 426-432.
8. Gorbatov A.A. und andere Akustische Methoden zur Abstandsmessung und Kontrolle. Klausel 2.3. Schallabsorption in Gasen. Moskau, Energoizdat, 1981, S. 39...43

ANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Detektion von unbemannten Kleinflugzeugen (UAV) in geringer Höhe, einschließlich der Aufzeichnung ihrer durch mechanische Vibrationen von Elektromotoren und die Drehung von Propellern verursachten akustischen Signale, dadurch gekennzeichnet, dass
 - zusätzlich ein optisches Signal jeweils im sichtbaren ($0,4 \dots 0,76 \mu\text{m}$) und/oder infraroten ($0,76 \mu\text{m} \dots 1 \text{ mm}$) Bereich der UAVs aufgezeichnet wird,
 - das Auftreten einer durch diese gleichen mechanischen Vibrationen verursachten parametrischen Modulation des optischen Signals erfasst wird, wobei eine Korrelation von akustischen und optischen Signalen des UAVs registriert wird, deren Vorhandensein die Erkennung der UAV anzeigt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrelation in einem durch die mechanischen Vibrationen von Elektromotoren und die Drehung von Propellern von UAVs verursachten (Nieder-)Frequenzbereich erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich eine aktive Radarerfassung im Millimeterbereich vorgesehen ist, deren Wellenlänge mit der Wellenlänge einer Resonanzabsorption in der Atmosphäre, übereinstimmt, vorzugsweise im Bereich von 1 mm bis 15 mm, innerhalb eines gegebenen (Flug-)Höhenbereichs von Drohnen, vorzugsweise zwischen 5 m und 50 m.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass es zusätzlich eine aktive akustische Detektion umfasst, die bei einer Wellenlänge der Resonanzstreuung von akustischen Wellen an unbemannten Luftfahrzeugen im Frequenzbereich von 10 kHz...20 kHz arbeitet.

5. 5. Verfahren nach den Ansprüchen 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass das akustische Signal der Drohne in geringer Flughöhe vom passiven akustischen Sensor (2) empfangen wird, vorzugsweise gleichzeitig mit dem modulierten optischen Signal der Drohne über den optischen Sensor (4), wobei die niederfrequenten Signale von den Ausgängen beider Sensoren vorzugsweise den Eingängen des Korrelometers (3) zugeführt werden, wobei das Signal vom Ausgang des Korrelometers (7) auf den Eingang der Koinzidenzfixierungsschaltung (7) geleitet werden kann und zusätzlich, vorzugsweise gleichzeitig, Signale vom aktiven akustischen Sensor (5) und vom Radarsensor (Radar) (6) auf die anderen Eingänge der Koinzidenzfixierungsschaltung (7) geleitet werden.
6. Vorrichtung (1) zur Detektion von unbemannten Kleinstflugzeugen (UAV) im Tiefflug, umfassend
 - einen passiven akustischen Sensor (2),
 - einen passiven optischen Sensor (4), und
 - ein Korrelometer (3), sowie
 - einen aktiven akustischen Sensor (5), der so eingestellt ist, dass er bei einer Wellenlänge der Resonanzstreuung von akustischen Wellen an UAVs im Frequenzbereich von 10...20 kHz arbeitet, und
 - einen aktiven Radarsensor (6), der mit einer Wellenlänge arbeitet, die mit der Wellenlänge einer Resonanzabsorption des Signals in der Atmosphäre im Bereich (1mm...15 mm) übereinstimmt und UAVs in Flughöhen von 5m...50 m erfasst.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, die eine Koinzidenzschaltung (7) enthält, deren drei Eingänge mit den Ausgängen des Korrelometers und des aktiven akustischen und des Radarsensors verbunden sind.