

Consulte las discusiones, las estadísticas y los perfiles de los autores de esta publicación en: <https://www.researchgate.net/publication/324511855>

Vigilancia pasiva portátil de baja complejidad mediante drones mediante señal basada en SDR Tratamiento

Artículo en la revista IEEE Communications · Abril de 2018
DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700424

CITAS
91

LECTURAS
6.806

4 autores, entre ellos:



Samith Abeywickrama
24 PUBLICACIONES 1,449 CITAS
[VER PERFIL](#)



Zhang Lihao
Universidad China de Hong Kong
11 PUBLICACIONES 149 CITAS
[VER PERFIL](#)



Chau Yuen
Universidad Tecnológica de Nanyang
1.392 PUBLICACIONES 49.540 CITAS
[VER PERFIL](#)

Dron pasivo portátil de baja complejidad

Vigilancia mediante procesamiento de señales basado en SDR

Hua Fu, Samith Abeywickrama, Lihao Zhang y Chau Yuen

Los autores presentan una visión general de la detección pasiva de drones. Se desarrolla un prototipo de periférico de radio universal portátil (USRP) basado en SDR para la detección en dos escenarios.

Abstracto

Este artículo presenta una visión general de la detección pasiva de drones. Se desarrolló un prototipo de periférico de radio universal por software (USRP) portátil, basado en SDR, para la detección en dos escenarios. En el escenario en el que un dron se comunica con el controlador terrestre, se emplean la señal ciclostacionaria de su señal y el principio pseudo-Doppler. En el escenario en el que el dron no envía ninguna señal, se utiliza una micro-Doppler generada por la señal de RF para la detección e identificación.

Introducción

El uso de drones civiles ha aumentado drásticamente en los últimos años debido a la reducción de costos. Asimismo, los drones están ganando popularidad rápidamente en todo el mundo. Sin embargo, su uso problemático ha suscitado preocupación pública. Por ejemplo, en marzo de 2016, un avión de Lufthansa estuvo a 60 metros de colisionar con un dron cerca del Aeropuerto Internacional de Los Ángeles; en abril de 2015, un dron cayó sobre las vías del metro cerca de la estación Commonwealth en Singapur; en enero de 2015, un dron se estrelló en la Casa Blanca, lo que generó preocupación por los riesgos de seguridad para el edificio gubernamental; y se ha acusado a los drones de ser utilizados para violar la privacidad e incluso para llevar a cabo actividades delictivas [1]. Estos eventos son un claro ejemplo de la importancia crucial que reviste el desarrollo de un sistema de vigilancia para drones sospechosos. Contar con un método de detección de drones y estimar su ángulo de llegada (AoA) está motivado por este propósito. Además, es igualmente importante que el método distinga al dron de otros objetos voladores, como las aves. Este artículo presenta una visión general de la detección y clasificación pasiva de drones, así como su estimación del ángulo de ataque (AoA) para dos escenarios: el caso en el que un dron se comunica con su controlador terrestre y el caso en el que un dron no envía ninguna señal. La principal contribución es triple. En primer lugar, realizamos un análisis detallado de la literatura sobre diversas metodologías de detección de drones; en segundo lugar, diseñamos un prototipo portátil y prácticamente funcional, de baja complejidad, utilizando hardware estándar; y en tercer lugar, demostramos la eficacia del sistema mediante la implementación y experimentación en campo, y analizamos los desafíos prácticos.

El artículo está organizado de la siguiente manera. Examinamos las diversas metodologías de detección. Presentamos

Detección pasiva y estimación del ángulo de ataque (AoA) cuando el dron envía una señal de enlace descendente. Analizamos la clasificación pasiva de drones mediante señales de RF de terceros. Concluimos el artículo.

Metodología de detección

Se han propuesto diversas metodologías para la detección de drones en el ámbito académico y la industria. En primer lugar, se empleó un método basado en vídeo [2] mediante el uso de una cámara. Este método puede proporcionar una imagen visual. La principal desventaja es que no funciona bien en condiciones meteorológicas adversas y no es aplicable de noche. Además, el tamaño del dron es pequeño y vuela a baja velocidad; por lo tanto, a veces resulta difícil distinguirlos de las aves.

Para la detección nocturna, se desarrolló la detección infrarroja mediante una cámara térmica [3]. El calor emitido por un dron se utilizó para la detección mediante el análisis de la imagen térmica. Sin embargo, el alcance de detección efectivo para un dron pequeño suele ser de unos pocos metros, ya que estos no producen mucho calor. Se ha empleado la detección por audio para la detección de drones [4]. Las firmas acústicas de diferentes drones del mercado se recopilan en una base de datos y se comparan con las grabadas para encontrar una coincidencia. Los entornos urbanos ruidosos con tráfico urbano plantean dificultades para el uso de este método.

Además, la firma de ruido de los drones puede alterarse fácilmente. Un método de detección basado en la dirección de control de acceso al medio (MAC) se ha considerado como una posible opción, ya que muchos vehículos aéreos no tripulados (UAV) comerciales de gama baja, incluidos los drones, tienen identificadores de conjunto de servicios (SSID) y direcciones MAC identificables que se transmiten [5]. El reto reside en mantener una base de datos de todos los drones fabricados; además, los puertos pueden modificarse y la dirección MAC puede falsificarse fácilmente para evitar la detección.

Otra técnica es la detección basada en firmas de radar [6]. En este método, se observan las mediciones de la sección transversal del radar (RCS) de los objetivos para su detección. Específicamente, se transmiten ondas de radio del radar dedicado y se utiliza la reflectividad del objetivo, caracterizada por la RCS, para verificar si se trata de un dron. Sin embargo, los drones representan un reto para la detección basada en RCS debido a su tamaño y a que están fabricados principalmente con materiales de baja conductividad, como plástico, caucho y espuma, lo que reduce su RCS. Los drones comerciales suelen operar a baja altitud, lo que también dificulta la detección basada en RCS.

Por último, el enfoque basado en la portadora RF proporciona un método robusto y eficaz de detección de drones [7], ya que puede funcionar día y noche y en cualquier condición climática. condiciones. En general, hay dos métodos para Detección basada en RF: detección activa y pasiva Detección. El enfoque activo es similar a la detección basada en RCS, que requiere que el transmisor y el receptor diseñados específicamente funcionen. De forma cooperativa. El transmisor transmite una señal de RF, mientras que el receptor escucha y Captura la señal reflejada del dron. El señal reflejada, que puede contener alguna información única Las características causadas por el dron en vuelo se analizan luego para confirmar la presencia de un dron y sus características físicas. Un ejemplo típico es utilizar los efectos Doppler causados por objetivos aéreos que Proporcionar información sobre la velocidad y, por lo tanto, habilitar La detección de objetos voladores. Aquí, las mediciones Doppler se pasan a través de una serie de filtros electrónicos y ejecutado por varias señales algoritmos de procesamiento para distinguir los drones de los otros objetivos voladores [8]. En el pasivo aproximación, no hay transmisor dedicado; solo El receptor necesita escuchar y analizar ondas electromagnéticas (EM) generadas por una dron, o generada por un transmisor de RF de terceros y dispersada por un dron. Por lo tanto, a diferencia de la Detección, donde el transmisor está hecho a medida Para facilitar la detección, no hay cooperación entre el receptor y el generador EM para la detección pasiva. En comparación con el enfoque activo, La detección pasiva tiene las ventajas de una menor costos en términos de requisitos de hardware y software (por ejemplo, en lugar de una gran fuente de alimentación, solo una Se necesita batería eléctrica), operación y mantenimiento, portabilidad y fácil implementación, resiliencia a la interceptación, etc. Por lo tanto, este artículo se centra en el enfoque pasivo, que incluye dos escenarios, es decir, el dron está enviando señal y el dron no envía ninguna señal. Tabla 1 Resume los diversos métodos de detección analizados.

Vigilancia pasiva mediante drones
señal de video de enlace descendente

En caso de que un dron envíe señales de radiofrecuencia (RF), la vigilancia se puede lograr interceptando la comunicación entre este y su controlador terrestre. Técnicamente, el sistema puede detectar un dron y estimar su ángulo de ataque (AoA) procesando los datos enviados desde el dron a su controlador mediante un receptor inalámbrico. Dado que la mayoría de los drones comerciales se comunican frecuentemente con sus controladores para actualizar su estado y recibir comandos, el enlace de datos entre el dron y su controlador está siempre presente. Por lo tanto, un receptor de RF puede recopilar muestras de datos inalámbricos, analizarlas y detectar la presencia de un dron.

Comunicación entre drones y controlador de tierra

El sistema de un dron suele incluir tres componentes: el dron, su controlador y un teléfono inteligente. El controlador es la principal fuente de comunicación con el dron. Este recibe la señal del controlador para gestionar su estado de vuelo, como seguir la trayectoria deseada.

Los siguientes son los tres principales canales de comunicación entre un dron y su controlador [9]:
Canal de enlace ascendente: Las instrucciones que controlan

Técnica	Metodología	Pros y contras
Vídeo [2]	Utilice una o más cámaras	(1) Proporcionar una imagen visual (2) Limitado por el clima (3) Baja capacidad de discriminación
Infrarrojos [3]	Identificar la firma de calor	(1) Puede trabajar de noche (2) Rango de detección corto
Audio [4]	Utilice el sonido externo creado por drones voladores	(1) Puede que no funcione bien en un entorno ruidoso. (2) La firma acústica se puede alterar
Identificación de dirección [5]	Identificador de conjunto de servicios (SSID)	(1) Necesidad de mantener una base de datos para todos los drones (2) Los puertos pueden ser modificados (3) La dirección MAC puede ser falsificada fácilmente
Radar firma [6]	Medición RCS	(1) Tarea desafiante porque el tamaño del dron suele ser pequeño y la mayoría de los drones están hechos con materiales de baja conductividad y operan a baja altitud. (2) Difícil de distinguir de otros objetos como los pájaros.
RF (activa) [7]	Retrodispersión del transmisor Señal de RF	(1) El transmisor está hecho a medida (2) Mejor rendimiento de detección (3) Alto costo (hardware, software, operación, etc.)
RF (pasiva) [8]	(1) Transmisión de video de enlace descendente (2) Dispersión electromagnética de señales de RF de terceros	(1) Resiliencia a la interceptación (2) Bajos costos, fácil implementación (3) Rendimiento de detección deficiente

Tabla 1. Resumen de los métodos de detección de drones.

Las instrucciones para la configuración del dron se generan mediante un teléfono móvil. El controlador transmite estas instrucciones al dron mediante el envío de datos de telecomando. Normalmente, la señal de telecomando se envía regularmente (p. ej., 30 veces/s para el Parrot Ar.Drone).

Canal de enlace descendente: El dron envía a su controlador la información de vuelo y las lecturas de los sensores a bordo, como altitud, posición, velocidad y trayectoria. Estas señales de telemetría también se transmiten regularmente. Por ejemplo, el Parrot Ar.Drone envió la información de enlace descendente aproximadamente 15 y 200 veces por segundo en modo de demostración y modo completo, respectivamente.

Vista en primera persona (FPV) de enlace descendente Canal: La cámara de video instalada en el dron puede transmitir el video en vivo en formato digital al controlador terrestre mediante un enlace RF descendente. Esta transmisión de video se visualiza posteriormente en el teléfono móvil del usuario.

La técnica de comunicación empleada en los drones comerciales suele basarse en los protocolos estándar inalámbricos existentes. Por ejemplo, tanto el canal de subida como el de bajada de los drones DJI Phantom 3 se encuentran en la banda industrial, científica y médica (ISM). El controlador de tierra puede crear un punto de acceso inalámbrico móvil que opera en la banda ISM, al que se conecta el teléfono móvil.

El esquema de modulación del canal de enlace ascendente utiliza espectro ensanchado por salto de frecuencia. La señal tiene un ancho de banda de 2 MHz y saltos en el rango de 2,4 a 10 MHz. Rango de 2,49 GHz. Los 8 canales de enlace descendente predeterminados ocupan el ancho de banda de 2,401 GHz a 2,481 GHz; cada uno tiene un ancho de banda de 10 MHz. El esquema de modulación para las transmisiones de video de enlace descendente utiliza multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). Esta señal OFDM enviada por el dron proporciona una fuente principal para la detección del dron y la estimación del ángulo de ataque (AoA).

OFDM es una multiplexación por división de frecuencia

Se sabe que el esta-
parámetros estadísticos como
la media, la varianza y
autocorrelación para la mayoría
comunicación artificial
Las señales de transmisión varían
en el tiempo con algunos
Periodicidades. Esto se debe
a la manipulación periódica
de la amplitud, la repetición del
código de expansión y el
preámbulo.

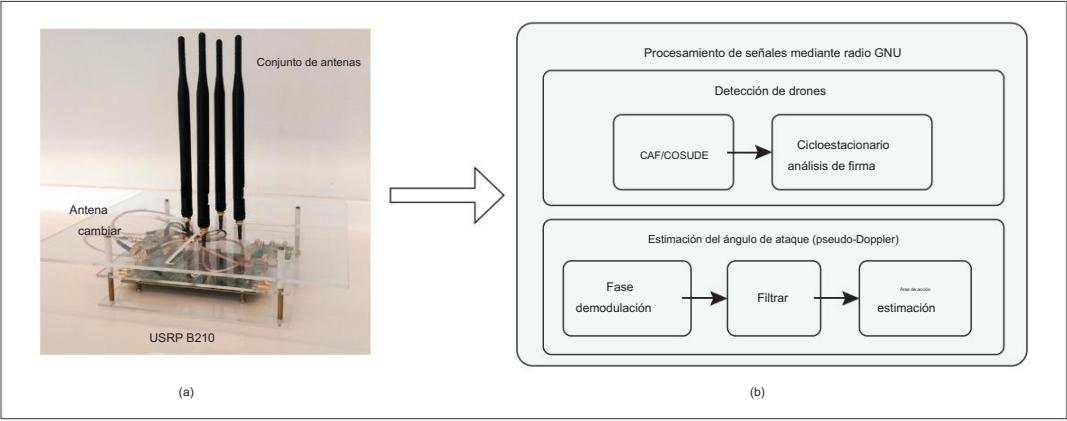


Figura 1. Diagrama funcional de detección y estimación con receptor USRP de un solo canal: a) Receptor basado en USRP ; b) algoritmo de detección y estimación.

Esquema que emplea múltiples tonos sinusoidales adyacentes como portadoras (es decir, subportadoras) dentro del mismo ancho de banda del canal. Las subportadoras se seleccionan para que sean ortogonales entre sí, de modo que el pico de una subportadora se produce en el punto cero de todas las demás. OFDM utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT) y la FFT inversa (IFFT) para realizar la modulación y demodulación multiportadora. En el transmisor, la IFFT se aplica a las subportadoras en el dominio de la frecuencia para producir símbolos en el dominio del tiempo. En el receptor, la FFT se aplica a los símbolos para recuperar los datos originales.

Prototipo usRP con receptor monocanal

La detección de drones y la estimación del ángulo de ataque (AoA) pueden realizarse mediante un conjunto de antenas con elementos desplazados espacialmente. La ubicación física de los elementos puede configurarse geométricamente en un conjunto lineal, plano y volumétrico. El espaciamiento del conjunto puede ser uniforme, no uniforme y aleatorio. El conjunto lineal uniforme (ULA) y el conjunto circular uniforme (UCA) son quizás los conjuntos de antenas más populares. En comparación con el ULA, el UCA es más compacto espacialmente. Por lo tanto, es más adecuado para una implementación portátil. En general, el receptor incluye el circuito de entrada de RF, que convierte la señal de RF a una señal de frecuencia intermedia (FI), el componente de conversión analógico-digital (ADC) donde se digitaliza la señal de FI, y el componente de conversión directa (DDC) que transforma la señal a banda base. Las muestras de datos en fase y en cuadratura de la señal de banda base se recopilan para el procesamiento de la señal y la detección y estimación.

Existen dos tipos de receptores: monocanal y multicanal. En el caso del receptor multicanal, cada elemento de antena va seguido de un receptor que incluye un front-end de RF, un convertidor analógico-digital (ADC) y un convertidor digital-digital (DDC). Esto significa que si un arreglo tiene N elementos, se necesitan N receptores. En la implementación monocanal, solo se utiliza un receptor para dar servicio a múltiples elementos de antena. Los métodos de estimación de alta resolución conocidos, como los algoritmos MUSIC y ESPRIT, son inherentemente multicanal. Esto se debe a que estos algoritmos requieren una observación instantánea; es decir, en un instante de tiempo determinado, por ejemplo, t, los datos de banda base de todos los elementos de antena deben extraerse simultáneamente para poder formular una matriz de correlación de datos. Esto no ocurre en la implementación monocanal, ya que

Solo se extrae una muestra de datos de elementos a la vez. Sin embargo, existe una contrapartida: el mejor rendimiento de la técnica multicanal en comparación con la monocanal. En primer lugar, la implementación multicanal requiere que los múltiples receptores sean coherentes. En particular, la fase y la ganancia de la antena deben estar sincronizadas, y esta sincronización debe mantenerse a lo largo de diferentes tiempos de procesamiento de la señal y un amplio rango de temperaturas de funcionamiento. En la práctica, se utiliza la calibración periódica en tiempo real para lograr este objetivo.

Claramente, esto aumentará la complejidad del hardware y el software, así como el consumo de energía. En segundo lugar, en comparación con el receptor multicanal, el sistema monocanal ofrece ventajas en cuanto a tamaño, flexibilidad, peso y coste. Por lo tanto, el sistema multicanal es más adecuado para aplicaciones con instalación fija. Para detectar un dron en vuelo, la portabilidad es crucial. Por consiguiente, es más recomendable un sistema portátil con un receptor monocanal.

La Figura 1 muestra el diagrama funcional basado en radio definida por software (SDR) utilizado en nuestro trabajo. El sistema de la Figura 1a consta del conjunto de antenas, el receptor monocanal basado en el periférico de radio universal por software (USRP) y el procesamiento de señales de radio GNU implementado en una computadora portátil. La antena está compuesta por cuatro elementos que forman un UCA. La salida de un elemento a la vez se envía al SDR, donde se implementa el procesamiento de señales para la detección de drones y la estimación del ángulo de ataque (AoA), como se muestra en la Figura 1b.

Detección de drones mediante firma de cicloestacionariedad

Como se mencionó anteriormente, la señal del dron se compone de una señal de control remoto de enlace ascendente y una señal de telemetría digital/transmisión de video de enlace descendente. La señal de video de enlace descendente tiene una forma espectral característica, que puede aprovecharse para la detección de drones.

Se sabe que los parámetros estadísticos, como la media, la varianza y la autocorrelación, de la mayoría de las señales de comunicación generadas por el hombre varían con cierta periodicidad. Esto se debe a la modulación periódica de la amplitud, el código de propagación repetitivo y el preámbulo. La propiedad de que los parámetros estadísticos de un proceso aleatorio varíen periódicamente se denomina cicloestacionariedad [10].

Se dice que una señal aleatoria tiene cicloestacionariedad de segundo orden si su función de autocorrelación es periódica en el tiempo. La autocorrelación se calcula multiplicando las amplitudes por dos.

instantes t y $t + t$ (donde t es un desfase temporal) de una función de muestra y luego promediar el producto sobre el conjunto (es decir, operación de expectativa).

En la práctica, la expectativa puede sustituirse por el límite de un promedio temporal. La función de autocorrelación proporciona una herramienta analítica para determinar el patrón de repetición de la señal. Dado que la función de autocorrelación es periódica, puede representarse mediante una serie de Fourier mediante la expansión de Fourier. Los coeficientes de Fourier correspondientes se denominan función de autocorrelación cíclica (CAF), cuya transformada de Fourier se define como la función de densidad de correlación espectral (SCD). Dado que la función CAF/SCD puede medirse con precisión incluso con una relación señal-ruido (SNR) baja, constituye una potente herramienta para la detección pasiva.

La comunicación FPV de enlace descendente de muchos drones utiliza tecnología WiFi basada en OFDM, basada en los estándares industriales IEEE 802.11 [11]. La señal WiFi se genera cuadro a cuadro. Cada cuadro incluye datos de preámbulo seguidos de símbolos OFDM. El preámbulo utilizado para la ecualización y sincronización del canal se transmite con magnitud y fase conocidas. Se implementa una IFFT de 64 puntos para un solo OFDM.

símbolo con un espaciado de portadora de 312,5 kHz. Este proporciona una duración de salida IFFT de 1/312,5 kHz = 3,2 ms. Entre las 64 subportadoras, quedan 12 sin usar, incluida la subportadora cero central; 48 son subportadoras de datos de información; 4 son para piloto tonos modulados por la misma secuencia de señal de modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) con frecuencias conocidas magnitud y fase. El prefijo cíclico de 0,8 Se añade ms como intervalo de guarda al principio. de cada intervalo de datos. El intervalo de símbolo total es por lo tanto de 4 ms. El análisis de CAF o SCD para esto Un marco de datos altamente estructural puede revelar la firma de cicloestacionariedad incrustada en el tipo WiFi. Señales OFDM. En particular, las señales inducidas por el piloto y propiedad de cicloestacionariedad inducida por prefijo cíclico Proporciona información muy útil y tiene más impacto. Para facilitar la detección, se incluye una tabla que enumera los Frecuencia portadora y ancho de banda de señal de varios Se generan drones disponibles en el mercado, y Los drones tienen una señal OFDM similar a WiFi en el Se puede detectar la lista. La figura 2a muestra nuestro ejemplo experimental sobre el CAF inducido por el piloto para La señal del DJI Phantom 3 muestra el primer pico a los 4,8 ms aproximadamente. Un pico más grande aparece a los 4,8 ms. Alrededor de 14 ms representa el patrón periódico para la señal de telemetría del dron. Tenga en cuenta que, aunque Tenemos múltiples picos en la Fig. 2a, para un valor dado transmisión de drones, los patrones como la intensidad de la señal en CAF serán diferentes para diferentes tipos de señales periódicas. En consecuencia, ningún sistema Se producirá ambigüedad.

Estimación del AoA por el principio pseudo-Doppler

La estimación del ángulo de ataque (AoA) se basa en el principio Doppler, que provoca que la frecuencia de la señal recibida aumente si el elemento de antena se acerca a la señal incidente y disminuya si se aleja. En la figura 1, supongamos que un elemento de antena UCA gira a una velocidad constante alrededor del eje central. A medida que el elemento de rotación se acerca y se aleja alternativamente de la señal incidente, la señal recibida en el elemento de rotación se modula sinusoidalmente en frecuencia con la frecuencia de rotación. Si pasamos la señal recibida a través de un receptor de modulación de frecuencia (FM)

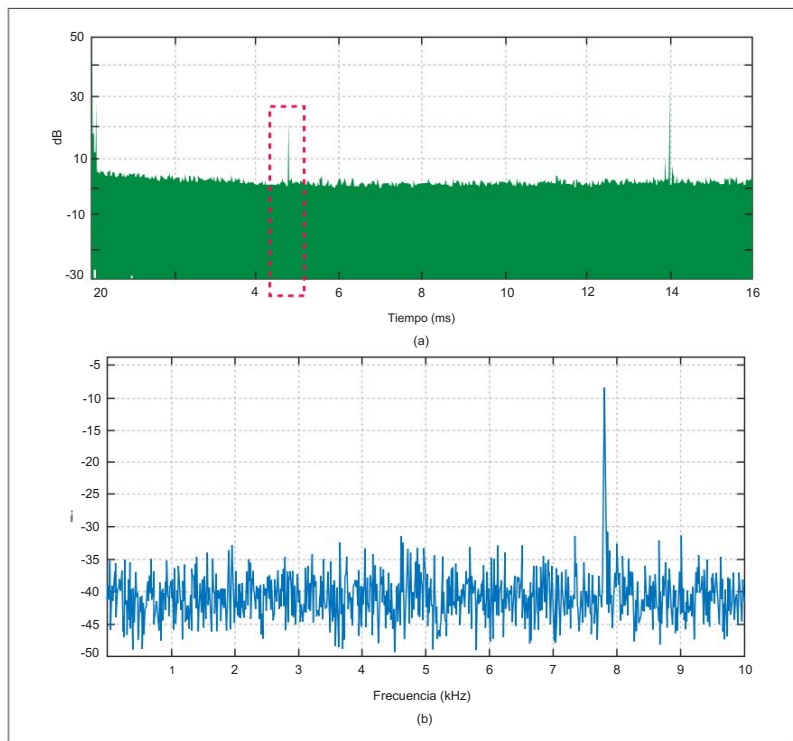


Figura 2. Detección basada en cicloestacionariedad y estimación basada en desplazamiento Doppler: a) un ejemplo de función de autocorrelación cíclica; b) desplazamiento Doppler debido a interruptor giratorio de elementos de antena.

er, el demodulador FM puede identificar la variación El desplazamiento Doppler se presenta como una señal FM superpuesta a la señal recibida. Por lo tanto, la salida del demodulador FM incluye una onda sinusoidal con la misma frecuencia de rotación. Al tomar la diferencia de fase de esta señal Doppler demodulada y una señal de referencia adquirida del circuito giratorio de la antena, se determina el ángulo de ataque (AoA).

Girar mecánicamente un elemento de antena no es deseable ni práctico. En su lugar, el elemento puede rotarse electrónicamente conmutando secuencialmente los cuatro elementos UCA de forma que el receptor se conecte a un elemento a la vez. La intuición es que, al conmutarse secuencialmente, el receptor lo percibe como si fuera una sola antena giratoria. Además, podemos utilizar el reloj del sistema (matriz de puertas programables en campo [FPGA]/USRP) para controlar la matriz de antenas, ya que el reloj de la FPGA garantizará que la conmutación se realice en sincronía con las muestras que llegan al host. Para el interruptor giratorio de RF de la Fig. 1, se utilizó el EK42441 de Peregrine Semiconductor en nuestro experimento, y en la Fig. 2b se muestra un desplazamiento Doppler de 7,8 kHz generado por un interruptor giratorio EK42441.

Como se ilustra en la Fig. 1, se obtiene una estimación del AoA utilizando un detector de FM mediante demodulación de fase. Los datos recibidos se pasan a un demodulador de fase que extrae la fase. La frecuencia instantánea se obtiene aplicando una operación de diferenciación. A continuación, se utiliza un filtro paso alto para eliminar la corriente continua. Esto produce una salida sinusoidal con la frecuencia de conmutación como frecuencia y el AoA como fase. La comparación de la salida con la referencia de conmutación proporciona el AoA.

El dron volador interactúa con el ambiente.

Señal de RF. La onda EM reflejada y dispersada será capturado por el receptor de vigilancia.

Por lo tanto, en el caso en que un dron volador no envíe ninguna señal, se puede aprovechar la RF de terceros para detectar pasivamente la señal reflejada.

onda EM dispersa para vigilancia con drones.

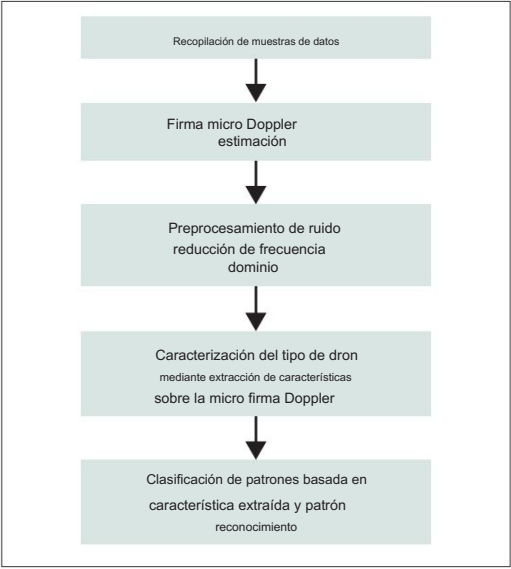


Figura 3. Diagrama de flujo de procesamiento de señales para clasificación pasiva a través de una señal de RF de terceros.

Detección pasiva vía
señal de RF de terceros

El vuelo de un dron también puede ser controlado de forma autónoma por la computadora de a bordo. Por ejemplo, un dron con GPS puede volar por sí solo con el destino, la altitud de vuelo y la velocidad planificados y configurados previamente. En este caso, el dron puede operar sin enviar ninguna señal, lo que puede generar un problema de seguridad más grave, ya que el dron utilizado para actividades delictivas y terroristas ahora puede volar de forma autónoma y, por lo tanto, operar más allá del alcance del controlador del dron y pasar desapercibido. Al no enviar ninguna señal, la detección debe basarse en la recopilación y el procesamiento de la dispersión y reflexión electromagnética del dron a partir de la señal de RF de terceros no cooperativos, como una señal de RF ambiental (es decir, un iluminador de oportunidad en el entorno), que incluye la transmisión comercial como la televisión, la transmisión de audio/video digital, las señales de navegación y la señal de la estación base celular como Long Term Evolution.

El dron volador interactúa con la RF ambiental. Señal. La onda EM reflejada y dispersada

El receptor de vigilancia puede capturar la señal. Por lo tanto, si un dron no emite ninguna señal, se puede aprovechar la radiofrecuencia de terceros para detectar pasivamente la onda electromagnética reflejada/dispersada para la vigilancia con drones. Una antena direccional puede apuntar a la fuente de la señal para obtener una señal de referencia limpia, mientras que la antena de detección escucha en diferentes direcciones para detectar la presencia de reflexiones electromagnéticas. La razón por la que, además de la antena de vigilancia, también necesitamos una antena de referencia es que, dado que puede haber muchas señales de radiofrecuencia de terceros, el detector debe saber exactamente qué señal dispersa/reflejada se utilizará para el procesamiento pasivo de la señal. La Figura 3 ilustra el diagrama de flujo del procesamiento de señales, cuyo algoritmo de detección se basa en la firma micro Doppler.

Firma micro DoPPler

Cuando un dron en vuelo interactúa con la señal de RF, las propiedades de la señal dispersa se reflejan en las características del dron. Se sabe que la frecuencia portadora de la señal dispersa del objetivo aéreo experimenta un desplazamiento de frecuencia debido al efecto Doppler. El fenómeno micro-Doppler es un efecto adicional donde cualquier otro movimiento en el cuerpo principal del objetivo introducirá un desplazamiento Doppler adicional alrededor del desplazamiento principal debido a dicho movimiento [12]. En este sentido, una señal micro-Doppler puede proporcionar información adicional sobre el objetivo. En el caso de un dron en vuelo, la señal micro-Doppler podría deberse a la vibración del cuerpo del dron y a la rotación de la hélice, y es única para los diferentes tipos de drones en vuelo, ya que la señal micro-Doppler asociada con la forma en que opera el dron depende de la configuración específica de la estructura del dron y de la hélice giratoria. Por ejemplo, las señales micro-Doppler para la misma velocidad de rotación de la hélice, pero con diferente número de palas, pueden aprovecharse para diferenciar drones.

Además, los experimentos han demostrado que para el mismo número y velocidad de hélices giratorias, diferentes materiales y tamaños de hélice pueden generar diferentes firmas micro Doppler.

La señal microDoppler real creada por la rotación de la hélice suele ser inestable y compleja, y generalmente es difícil encontrar expresiones matemáticas cerradas, explícitas y exactas para la señal microDoppler. Para resumir...



Figura 4. Configuración del experimento para la firma micro Doppler.

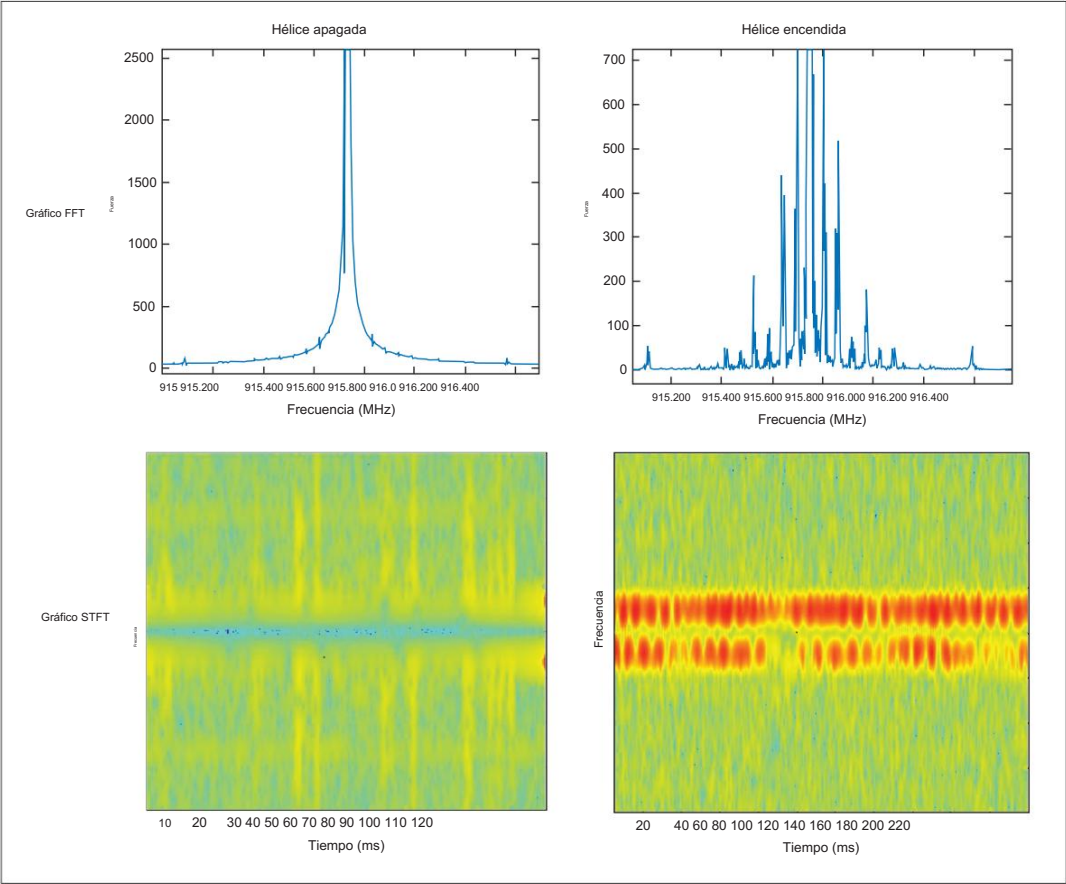


Figura 5. Firma micro Doppler de la hélice de un dron.

Para la representación visual de la señal microDoppler, se puede utilizar alguna representación visual. Una de estas representaciones se obtiene procesando las señales microDoppler mediante la representación gráfica de un espectrograma. El espectrograma es un gráfico de tiempo-frecuencia de la señal que varía con el tiempo. Esto se suele generar aplicando la transformada de Fourier de corta duración (STFT) a la señal microDoppler de dominio temporal. En resumen, los datos de dominio temporal generados por la señal de RF dispersa se segmentan primero en intervalos de tiempo cortos e iguales, denominados ventanas. A continuación, se aplica la transformada de Fourier a cada segmento de la ventana. En general, la implementación incluye los siguientes pasos clave:

1. Determine el tamaño de la ventana y la superposición entre ventanas sucesivas.
2. Elija la función de ventana.
3. Multiplica las muestras de datos con ventanas.
Función para generar segmentos de ventana.
4. Realice FFT en cada segmento con ventana.

La figura 4 ilustra nuestra configuración experimental para Medición de la microfirma Doppler. Se utiliza una señal monotonal de RF no cooperativa como iluminador. El experimento se lleva a cabo en un campus abierto, rodeado de edificios y árboles.

El dron es un cuadricóptero DJI Phantom 3. El diámetro del rotor es de 23,5 cm. El ordenador portátil es un HP ENVY DV6 con procesador Intel® Core™ i7, y el sistema operativo es Linux Ubuntu 14.04. Se utiliza GNURadio 3.8 para la implementación del SDR. En la configuración que se muestra en la imagen de la izquierda, el iluminador, el dron y el receptor SDR están aproximadamente alineados, mientras que en la imagen de la derecha, el ángulo entre el iluminador, el dron y el receptor se ajusta de forma arbitraria.

La Figura 5 muestra un resultado experimental de la firma micro Doppler. Las dos imágenes de la primera fila se generaron mediante un gráfico FFT, y las dos imágenes de la segunda fila se crearon mediante STFT. Las dos imágenes de la primera columna corresponden a la hélice del dron apagada (es decir, solo se representan la FFT y la STFT de la señal del iluminador), y las dos imágenes de la segunda columna representan la señal microDoppler de la hélice del dron. Se puede observar que la señal microDoppler de una hélice en rotación es muy distintiva.

Extracción y clasificación de características para
detección de drones

Si las firmas microDoppler son distintivas, incluso pueden ser separadas visualmente por humanos simplemente observando la imagen del espectrograma. Sin embargo, la tarea no es fácil si se utiliza una máquina como una computadora para el reconocimiento automático de objetivos (ATR). Obviamente, para la detección de drones, la implementación de ATR es más conveniente. En este caso, se puede emplear el aprendizaje automático [13], que incluye dos componentes principales: la extracción de características y la clasificación de patrones. La idea clave es que, dado que los diferentes tipos de drones tienen diferentes firmas microDoppler, mediante el entrenamiento y la clasificación de señales se puede derivar una característica única de un dron en particular, que luego es utilizada por ATR para el reconocimiento de patrones.

Como sugiere el término, la extracción de características tiene como objetivo extraer los parámetros característicos que forman la base de la firma micro Doppler. Dado que una máquina solo puede "leer" y manejar números reales, las características suelen representarse numéricamente.

Dado que una máquina puede
Solo "leer" y manejan
números reales; las
características suelen
representarse
numéricamente.
Además, para facilitar el aprendizaje y la c
Para acelerar este proceso,
las características deben ser
Altamente informativo y
discriminante, y el número
de característica debe
No sea demasiado grande.

Después de la extracción de características
El conjunto de características puede ser
Pasado a un clasificador
para identificar los tipos de
drones. La decisión
sobre el dron
El tipo puede ser creado
mediante un sistema
predefinido que consta de
regularidades y reglas establecidas
mediante un proceso de aprendizaje
mediante entrenamiento de señales.

icamente. Además, para facilitar el aprendizaje y la clasificación, y acelerar este proceso, las características deben ser altamente informativas y discriminantes, y el número de características no debe ser demasiado grande (usando la terminología, esto significa que la dimensión de un vector de características debe ser baja). La primera característica en la firma micro Doppler es la velocidad del cuerpo principal de un dron. Es un parámetro que describe el movimiento del cuerpo del dron en su conjunto. El desplazamiento Doppler principal se debe a esta velocidad. Dado que la mayoría de los drones vuelan a velocidades relativamente bajas, la velocidad del cuerpo principal puede ser débil. La segunda característica es la velocidad de rotación o período de rotación de la hélice. Debido a la naturaleza rotatoria de la hélice, la señal micro Doppler es periódica. La velocidad o período de rotación es un parámetro clave, ya que es la principal causa del espectrograma periódico. La tercera característica es la velocidad de rotación de la punta de la pala de la hélice. Este parámetro es la principal causa del ancho del espectro y, por lo tanto, puede estimarse mediante el ancho de banda espectral.

Existen varias técnicas de extracción de características [13]. Una popular es la descomposición en valores singulares (SVD), que es una generalización de la descomposición propia. SVD es una herramienta de factorización matricial que puede descomponer cualquier matriz en espacios ortogonales [14]. Además, SVD puede encontrar la mejor aproximación a la matriz de datos original utilizando menos dimensiones. Por lo tanto, SVD puede ofrecer tanto extracción de características como reducción de dimensión. Una imagen de espectrograma basada en STFT puede verse como un conjunto de datos 2D. Una dimensión representa la estructura de frecuencia de la señal y la otra representa la dimensión en la que se muestrean dichas estructuras de frecuencia. El objetivo de la extracción de características es determinar las estructuras de frecuencia características que varían con el tiempo. Al aplicar SVD, el espectrograma se descompone en un producto de la matriz unitaria izquierda, la matriz diagonal y la matriz unitaria derecha, y la información de frecuencia y tiempo se desacoplan. La información de frecuencia se proyecta sobre los vectores singulares de la matriz unitaria izquierda, y la información de tiempo se proyecta sobre los vectores singulares de la matriz unitaria derecha.

Tras la extracción de características, el conjunto de características puede transferirse a un clasificador para identificar los tipos de drones. La decisión sobre el tipo de dron puede tomarse mediante un sistema predefinido compuesto por regularidades y reglas establecidas mediante un proceso de aprendizaje mediante entrenamiento de señales.

conclusión

Se presenta una revisión exhaustiva sobre la vigilancia con drones. Se discuten dos métodos basados en la implementación de USRP y el procesamiento de señales SDR para la detección y clasificación pasiva de drones, así como la estimación del ángulo de ataque (AoA). Para el método que utiliza la señal de enlace descendente del dron, se desarrolla la detección mediante ACF/SCD y la estimación del AoA mediante el principio pseudo-Doppler. Para el método que explota la señal ambiental de RF, se presenta la clasificación de drones mediante la firma microDoppler y el aprendizaje automático. Nuestro experimento también revela que, en comparación con una hélice de fibra de carbono, la firma microDoppler de una hélice de plástico es mucho menos visible. El canal de ondas electromagnéticas entre un dron y el receptor de vigilancia a menudo puede modelarse mediante desvanecimientos a pequeña escala y pérdidas de trayectoria a gran escala, y estos desvanecimientos a pequeña escala pueden generalizarse.

se caracterizan por una distribución riciana [15]. El factor Rician refleja el grado de línea de visión (LdV). En un entorno urbano, el desvanecimiento de Rayleigh se utiliza para modelar el caso en que no hay LdV disponible (es decir, el factor Rician se vuelve cero). El funcionamiento en un entorno sin LoS puede suponer un serio reto para ambos métodos pasivos. Se ha demostrado [15] que la altitud de vuelo del dron puede desempeñar un papel importante en la determinación del factor Rician y la probabilidad de LoS, lo que a su vez afecta a la relación señal-ruido (SNR) recibida. Además, se puede utilizar un método adaptativo para mejorar la estrategia de detección en caso de que no haya línea de visión LoS [15]. Estos aspectos constituyen una investigación prometedora para futuras investigaciones.

referencias

[1] A. Morrow, "Pareja acusa a vecino de acecho con Drone", suJAS News, 14 de diciembre de 2014; <https://www.suasnews.com/2014/12/couple-accuses-neighbor-of-stalking-with-drone/>, consultado el 7 de noviembre de 2016.

[2] Dronedefence, "Sistema de alerta de drones con múltiples sensores"; <http://www.dronedefence.co.uk/Technology>, consultado el 7 Noviembre de 2016.

[3] IEC, Banshee; <http://www.iecinfared.com/products/inte-grated-systems/banshee/>, consultado el 7 de noviembre de 2016.

[4] Drone-detector.com, Drone-Detector; <http://www.drone-de-tector.com/en/drone-detector-main-features/>, consultado el 7 Noviembre de 2016.

[5] M. Richardson, "Drones: detectar, identificar, interceptar y Hijack", 2 de diciembre de 2015; <https://www.ncogroup.trust/uk/about-us/newsroom-and-events/blogs/2015/december/drones-de-tect-identify-intercept-and-hijack/>, consultado el 7 de noviembre de 2016.

[6] T. Pultarova, "Radares para prevenir colisiones entre drones y aeronaves Ya en pruebas", 8 de diciembre de 2014; <https://eandt.theiet.org/content/articles/2014/12/radars-to-prevent-drone-aircraft-collisions-already-in-testing/>, consultado el 20 de noviembre de 2015.

[7] P. Nguyen et al., "Investigación de sistemas rentables basados en RF" Detección de drones", Acta de la 2.ª semana de microvehículos aéreos Redes, sistemas y aplicaciones para uso civil, Singapur, junio de 2016, págs. 17-22.

[8] DeTect, "Sistemas de radar de seguridad y vigilancia", <http://www.detectinc.com/security.html>, consultado el 7 de noviembre de 2016.

[9] Keysight Technologies, "Pruebas de RF para vehículos civiles no tripulados" Vehículos aéreos", Nota de aplicación, 18 de enero de 2016; <http://literatura.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1299ES.pdf?id=2705785>, consultado el 27 de octubre de 2016.

[10] WA Gardner, A. Napolitano y L. Paura, "Cicloestacionaridad: medio siglo de investigación", Signal Processing, vol. 86, n.º 4, abril de 2006, págs. 639–97.

[11] G. de Goeij, EH van Dijken y F. Brouwer, "Investigación sobre el riesgo de interferencia de radio de los drones", FIGO & Strict, mayo 2016; https://www.agentschaptelecom.nl/sites/default/archivos/investigaci3n_sobre_los_riesgos_de_interferencia_de_radio_de_los_drones.pdf, consultado el 31 de enero de 2017.

[12] C. Clemente et al., "Desarrollos en la micro-Doppler objetivo Análisis de firmas: imágenes de radar, ultrasonidos y radar a través de la pared", EURASIP J. Advances in Signal Processing, vol. 2013, n.º 1, marzo de 2013, págs. 47–65.

[13] XD Zhang, Y. Shi y Z. Bao, "Un nuevo vector de características Uso de Bispectra Seleccionados para Clasificación de Señales con Aplicación en Reconocimiento de Objetivos de Radar", IEEE Trans. Signal Processing, vol. 49, núm. 9, septiembre de 2001, págs. 1875–85.

[14] S. Selvan y S. Ramakrishnan, "Modelado basado en SVD para Clasificación de texturas de imágenes mediante la transformación wavelet IEEE Trans. Image Processing, vol. 16, no. 11, octubre de 2007, págs. 2688–96.

[15] MM Azari et al., "Comunicación UAV ultra confiable Utilizando la altitud y la diversidad de cooperación", preimpresión de arXiv, arXiv:1705.02877v1, [cs.IT], 28 de abril de 2017, <https://arxiv.org/abs/1705.02877>, consultado el 1 de agosto de 2017.

