

УДК 621.396.967(075.8)

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/10>**Орлов А.Т.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Трапезон К.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ІНФРАЗВУКОВИХ СЕНСОРІВ У РАЗІ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Наведено два підходи для виявлення повітряних об'єктів в рамках класичної теорії локації. Перший підхід пов'язаний з оцінкою напруженості електричного поля уздовж траєкторії польоту літального апарату. Другий підхід полягає в оцінці випромінювання з боку літального апарату на основі роботи мобільної пасивної радіолокаційної станції і набору інфразвукових сенсорів. Запропоновано технічне рішення щодо поєднання під час виявлення літальних апаратів пасивного пеленгатору сигналів і активного радіолокаційного далекоміру. Такий спосіб дозволяє швидше розв'язати задачу локації і визначити координати та траєкторію руху літального апарату. Проаналізовані вимоги до інфразвукових пеленгаторів сигналів на основі перетворення формули з визначення дальності пасивної радіолокації. Відмічено, що необхідна дальність дії пасивних пеленгаторів досягається істотно меншими енергетичними витратами. На основі проведеного аналізу в рамках дослідження сформульовані особливості функціонування інфразвукових сенсорів. Так, наголошено, що інфразвуковий сенсор через певні особливості розповсюдження інфразвукових сигналів в просторі може забезпечити більш раннє виявлення цілі у порівнянні з роботою стандартної радіолокаційної станції, яка працює на випромінювання. Запропоновано рішення щодо можливості використання в пасивній радіолокаційній станції набору інфразвукових сенсорів. Цей прийом дозволяє швидше розв'язати задачу пасивної локації, адже збільшується при цьому і точність, і кількість інформаційних каналів, які надають інформацію про ціль. Визначено положення, які слід враховувати під час виявлення повітряних об'єктів, які рухаються на низьких висотах. Зокрема, оцінка ефективності роботи традиційної радіолокаційної станції вимагає врахування екрануючої дії місцевості. За використання ж інфразвукових сенсорів така оцінка місцевості не є основною під час розв'язання задачі локації.

Ключові слова: локація, пеленгатор, сигнал, сенсор, перешкода, інфразвук, мобільна радіолокаційна станція.

Постановка проблеми. Розв'язання задачі локації в умовах наявної радіоелектронної боротьби та стрімкої модернізації конструкцій літальних апаратів потребує все нові підходи до точного і швидкого визначення координат літальних апаратів. Одним із запропонованих підходів може бути використання інфразвукових сигналів як носіїв інформації з визначення місця розташування цілі. Особливо таке рішення може бути доцільним, коли літальний апарат переміщується на низьких висотах (до 10 км) і традиційні системи протиповітряної оборони при цьому не можуть ефективно працювати. Проблема ж полягає не лише в алгоритмі застосування інфразвукових сигналів і теорії їх розповсюдження, але й у способі обробки інформації на тлі наявного екранування місцевості та перешкод, як активних, так і пасивних. Особливо це важливо, коли використовуються так звані «інтелектуальні» радіо-

перешкоди. Зрозуміло, що проблема розв'язання задачі локації при цьому буде пов'язана і з точністю визначення координат літального апарату. І вибір пасивного інфразвукового пеленгатору відіграє в цьому не останню роль. Очевидно, що традиційні локаційні станції з секторним чи круговим оглядом можуть призвести до ситуації, за якої визначення координат об'єкта, особливо коли він переміщується на вкрай низьких висотах, є неможливим.

Постановка завдання. На основі наявних підходів з виявлення літальних апаратів у рамках класичної теорії локації необхідно запропонувати рішення щодо конструкції пасивного пеленгатору сигналів, за умови, коли останній оперує інфразвуковими сигналами. При цьому необхідно врахувати вимоги до інфразвукового пеленгатору і сформулювати особливості на основі формули дальності радіолокації з роботи останнього

в умовах радіоелектронної боротьби. Додатково необхідно розробити схему прийому інфразвукових сигналів для мобільної радіолокаційної станції з вибором методу визначення місця розташування повітряних об'єктів.

Метою статті є визначення підходів зі створення пасивної системи виявлення літальних апаратів, які переміщуються на низьких висотах. Додатково необхідно запропонувати технічні рішення з розташування елементів пасивного пеленгатору сигналів в умовах підвищеної завадової обстановки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для виявлення повітряних об'єктів можна використовувати різні підходи [1–4]. У рамках дослідження розглянемо два підходи: на основі оцінки напруженості електричного поля і на основі радіо-теплого випромінювання з залученням пасивного радіолокаційного пристрою та інфразвукових сенсорів.

В основі першого підходу знаходиться принцип, за яким під час польоту в атмосфері, де зосереджені хмари і можливі опади на літальному апараті (ЛА), накопичується електричний заряд $10^{-7} \div 10^{-4}$ Кл. Величина заряду залежить від швидкості руху, матеріалу корпусу ЛА і стану атмосфери. Накопичення електричного заряду на корпусі ЛА призводить до зміни напруженості електричного поля \vec{E} уздовж траєкторії польоту ЛА (рис. 1). Реєстрація та обробка зміни електричного поля дозволяє встановити факт наявності об'єкту і дозволяє визначити координати цього об'єкту [5–7]. Реєстрація змін електричного поля здійснюється електро-

статичними сенсорами. Електростатичні сенсори здійснюють обробку корисного сигналу, природних перешкод і прийняття рішення про виявлення ЛА, яке разом з оцінкою часу виявлення передається в пункт спільної обробки (ПСО). Чутливий елемент сенсора (рис. 1) являє собою перетворювач напруженості електричного поля на напругу, який використовує вільні заряди в провіднику. Обробка сигналів у сенсорі включає компенсацію завад, виділення корисного сигналу та прийняття рішення про тип літального апарату. Пункт спільної обробки реалізовано програмним чином і він призначений для управління системою виявлення та визначення координат літального апарату.

Другим підходом визначення наявності повітряних об'єктів є використання пасивної радіолокації, де виявлення реалізується без опромінення на основі природнього радіо-теплого випромінювання цілей з залученням пасивного радіолокаційного пристрою, до якого входить приймач в інфразвуковому діапазоні та антенна система. Цей пристрій називають ще пасивним пеленгатором, і він може складати основу мобільної пасивної радіолокаційної системи [7].

Основною перевагою пасивних пеленгаторів є скритність його роботи, а недоліком – складність селекції об'єкта по дальності. У зв'язку з цим найбільш доцільно використання пасивного радіолокаційного пристрою в сукупності з радіолокаційними далекомірами. Використання в одному пристрої пасивного (радіометричного) режимів роботи дозволило б компенсувати позитивні якості і звести до мінімуму їх недоліки. Таке

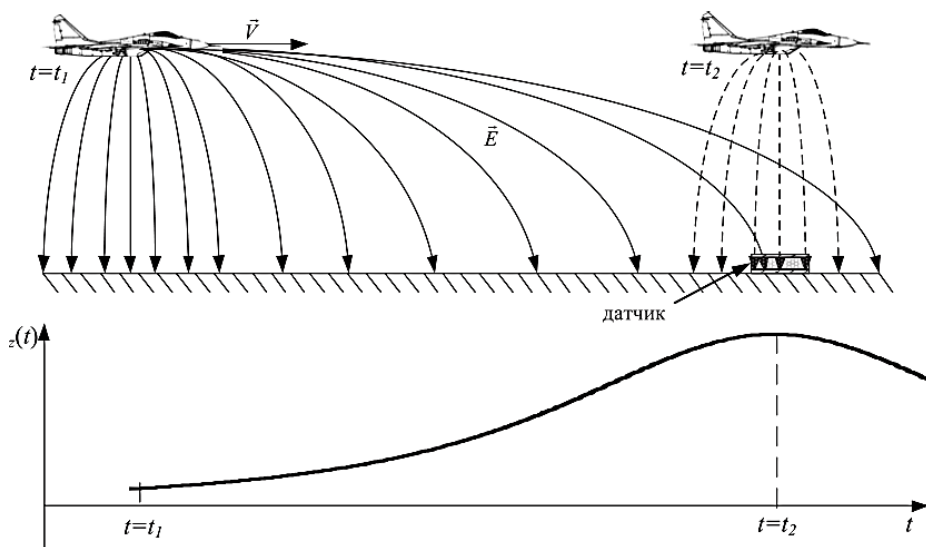


Рис. 1. Принцип виявлення цілі пасивним сенсором інфразвуку

комплексування дозволяє отримати нові позитивні якості станції, зокрема, в пасивному режимі можливий огляд простору (без випромінювання НВЧ енергії), а в активному режимі можливо вимірювання дальності до виявленого об'єкту. Активний радіолокаційний далекомір – це радіолокаційний пристрій, який можна розглядати як аналог активної радіолокаційної станції. Для таких систем (з дальністю дії до 1 км – в пасивному режимі роботи і 1,5 км в активному режимі) може бути використано робочий діапазон хвиль у «вікнах прозорості» короткохвильової частини міліметрових діапазонів радіохвиль (довжини хвиль 1,3 і 2,15 мм).

Особливості функціонування пасивних пеленгаторів

Однією з основних вимог до інфразвукового пеленгатора, або по-іншому – інфразвукового сенсора, є дальність дії, яку можна визначити через перетворення формули дальності пасивної радіолокації:

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{\Delta T_0 S_0 G}{4\pi q_m \Delta T_{np}}} \cdot 10^{-0.005\gamma}, \quad (1)$$

де ΔT_0 – величина радіоконтрасту цілі; S_0 – площа цілі; G – коефіцієнт підсилення фотопровідної антени; q_m – коефіцієнт розрізненості, який враховує перевищення сигналу від об'єкту над чутливістю пасивного радіолокаційного пристрою; γ – коефіцієнт послаблення хвиль в атмосфері; ΔT_{np} – флуктуаційна чутливість приймача. При цьому слід відмітити, що необхідна дальність дії пасивних пеленгаторів досягається істотно меншими енергетичними та масо-габаритними витратами, що очевидно впливає з порівняння формул дальності радіолокації (1) і дальності пасивного пеленгування:

$$D_{nt} = \sqrt{\frac{P_{пер} G_{МРЛС} G \cdot \lambda^2}{16\pi^2 \cdot P_{прМП}}},$$

де $P_{пер}$ – вихідна потужність передавача мобільної радіолокаційної станції; $G_{МРЛС}$ – коефіцієнт підсилення антени мобільної станції; λ – довжина хвилі під час передавання та прийому; $P_{прМП}$ – чутливість приймача пасивного пеленгатора. На основі наведених співвідношень можна сформулювати в рамках дослідження такі головні особливості функціонування пасивних пеленгаторів.

По-перше, пасивний пеленгатор, побудований на основі детекторних приймачів з чутливістю 10^{-7} Вт і встановлений на об'єкті з ефективною

площею розсіювання до 3000 м², буде забезпечувати більш раннє виявлення об'єкта з випромінюючої стандартної навігаційної радіолокаційної станції в порівнянні з виявленням цією станцією носія такого пеленгатора.

По-друге, частотні характеристики антен і приймачів пасивного пеленгатора принципово можуть бути реалізовані в досить широкому діапазоні (з перекриттям до 4), що забезпечує можливість виявлення і пеленгування станціями, які працюють на самих різних частотах і мають різне призначення.

По-третє, застосування спеціальних засобів і алгоритмів обробки сигналів, які виявляються пасивним пеленгатором, дозволяє визначити великий перелік параметрів випромінюючих станцій, сукупність яких забезпечує високу ймовірність визначення типу не тільки радіолокаційної станції, але і її носія. До таких параметрів належать передусім несуча частота передавача станції, тривалість, період повторення і форма зондуючих імпульсів, форма і ширина діаграми спрямованості, період сканування антени станції тощо.

Більшість відомих способів визначення напрямку приходу прийнятих радіолокаційних сигналів засновані на обчисленні і перетворенні фазових і / або амплітудних співвідношень у прийомних каналах, підключених до антен, які мають певні діаграми спрямованості (ДС) і певним чином орієнтовані на об'єкт-ціль.

Підходи до виявлення повітряних об'єктів

Використання в мобільній радіолокаційній станції декількох сенсорів (рис. 2) дозволяє визначити прямокутні координати, напрямок та швидкість польоту за різницею часів виявлення сенсорами літального апарату. Для однозначного визначення типу цілі слід використовувати в складі мобільної радіолокаційної станції не менше трьох сенсорів. Задля виконання задачі пасивної локації сенсори розміщуються на місцевості з частковим перекриттям зон виявлення. Розміри зони виявлення сенсорів системи мобільної радіолокаційної станції характеризуються такими показниками:

- Ширина зони виявлення за фронтом 2...9 км;
- Відстань між сенсорами 100...450 м;
- Діапазон висот руху цілей, що виявляються – 5...500 м.

Поєднання інфразвукових сенсорів з блоками цифрової обробки сигналів дає можливість збільшити число одночасно інформаційних каналів, які аналізуються і тим самим виключають вплив рівня сигналів, які надходять на загальну точність визначення дальності до цілі.

Для того щоб сформулювати вимоги до програмно-апаратної реалізації цифрової частини пеленгатора, необхідно уточнити, яким чином проводиться визначення відстані від імпульсного джерела інфразвуку до бази пристрою. Традиційно визначення відстані здійснюється на основі аналізу інфразвукових хвиль, відбитих від цілі. Також відомий спосіб визначення відстані на основі аналізу інфразвукових хвиль, які відбиваються від цілі: спочатку обчислюється азимут, а потім визначається відстань до джерела відносно пеленгаційного пристрою.

Відомо кілька методів визначення місця розташування об'єктів за допомогою сигналів (пеленгаційний, далекомірний, різницево-далекомірний, пеленгаційно-далекомірний).

Але для аналізу інфразвукових хвиль може застосовуватись лише пеленгаційний метод. Зазначений метод заснований на обчисленні азимута цілі в рознесених на відстань бази b двох пеленгаційних пристроїв (точки «А» і «В» на рис. 3).

Очевидно, що під час виявлення мобільними радіолокаційними системами повітряних об'єктів на низьких висотах значну екрануючу дію створює рельєф місцевості і місцеві предмети, що призводить до зменшення дальності дії локаційної системи. Проведення оцінок ефективності роботи радіолокаційних систем по таких апаратах вимагає врахування екрануючої дії місцевості. При цьому одним із найбільш раціональних способів підвищення ефективності виявлення низькоповітряних об'єктів радіолокаційними засобами є підйом фазового центру антени радіолокаційної системи над землею поверхнею. Також виявлення сигналу, відбитого від об'єкта, буде проводитися на тлі інтенсивних перешкод – відображень від земляної поверхні і місцевих предметів, що передбачає реалізацію високоефективної системи придушення (ком-

пенсації) пасивних перешкод. Ці два фактори у вирішенні проблеми виявлення маловисотних повітряних об'єктів можна виділити як основні.

Проблеми локації об'єктів на фоні перешкод

На практиці в наявних мобільних радіолокаційних системах здебільшого використовуються алгоритми, засновані на розпізнаванні по траєкторних ознаках. Це можна пояснити тим, що технічні параметри радіолокаційної станції зазвичай оптимізуються для вирішення завдання виявлення сигналу на фоні перешкод. При цьому алгоритми розпізнавання, як «другорядні» доводиться синтезувати з свідомо «неоптимальними» параметрами. Найбільш показовий (який часто зустрічається на практиці) приклад – випадок короткої вибірки сигналу. Останнім часом у зв'язку з постійним і інтенсивним розвитком технологій і засобів радіоелектронного боротьби вкрай актуальною є проблема розпізнавання і захисту від інтелектуальних радіоперешкод, до яких передусім належать імітуючі сигналподібні радіоперешкоди. Перешкоди цього класу призводять до найбільш істотного порушення функціонування радіолокаційних систем і дезорієнтації шляхом формування на індикаторі відміток від помилкових об'єктів. Результатом впливу таких перешкод є, наприклад, невиявлення сигналів луни від об'єкта або перевантаження обчислювальної системи через обробку великого об'єму невірної інформації. Варіанти побудови радіотехнічних систем, які формують псевдорадіоперешкоди, вельми різноманітні, однак в основі таких систем побудови лежить принцип ретрансляції зондуючого сигналу зі зміненими параметрами, що містять інформацію про координати і швидкості об'єкта. Особливо варто наголосити на важливості розгляду перешкод цього класу і методів захисту від них у рамках проблеми виявлення низько повітряних об'єктів. Це пояснюється тим, що найбільш перспективним напрямом

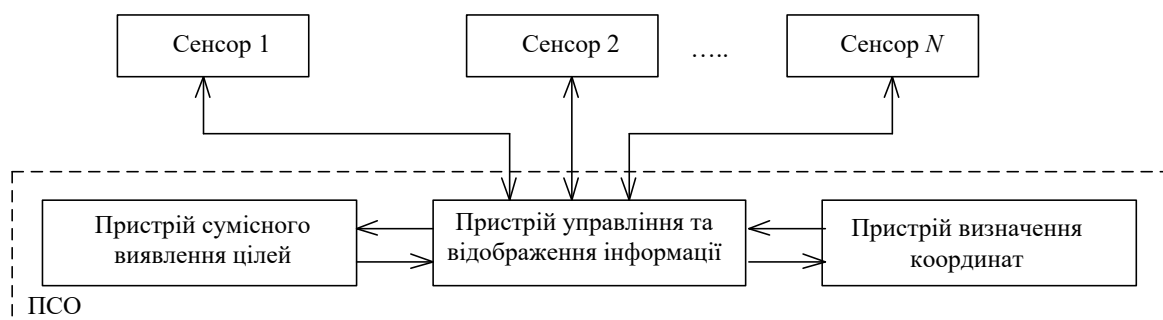


Рис. 2. Схема системи прийому сигналів

технічної реалізації радіосистем є завадостворювачі їх розміщення на літальних апаратах різних класів, які діють на малих і надмалих висотах. Ще одним напрямом інтелектуальних радіоперешкод, який активно розвивається останнім часом, є так званий «GPS-спуфінг» – підміна сигналу від космічного GPS-супутника хибним більш потужним сигналом. Для захисту від дії імітують сигналоподібні радіоперешкоди. Є ряд методів захисту від інтелектуальних перешкод на різних етапах обробки радіолокаційної інформації. Однак у багатьох випадках ці методи не завжди ефективні, оскільки вимагають впровадження додаткових апаратних засобів, апріорних знань про сигнально-завадове оточення. Для радіолокації характерно багатопроменеве поширення сигналів через наявність земної поверхні, вплив якої особливо істотно за малих кутів місця. Тому в вертикальній площині зона виявлення має «порізаний» вигляд з чергуванням максимумів і мінімумів. Наявність мінімумів може привести до втрати цілі на відповідних кутах місця. Найсильніше цей небажаний ефект проявляється при виявленні повітряних об'єктів на малих і гранично малих висотах (50–500 м), тобто за малих кутів місця. При цьому очевидно, що цей ефект буде також залежати від діапазону довжин хвиль і висоти фазового центру антени.

Висновки. Наведено підходи з виявлення повітряних об'єктів у рамках класичної теорії локації. Перший підхід пов'язаний з оцінкою напруженості електричного поля \vec{E} уздовж траєкторії польоту літального апарату (рис. 1). Другий підхід полягає в оцінці випромінювання з боку літального апарату на основі аналізу роботи мобільної пасивної радіолокаційної станції та набору розміщених у просторі інфразвукових

сенсорів. Запропоновано технічне рішення щодо поєднання під час виявлення літальних апаратів пасивного пеленгатору сигналів і активного радіолокаційного далекоміру. Такий спосіб дозволяє швидше розв'язати задачу локації і визначити координати та траєкторію руху літального апарату.

Проаналізовані вимоги до інфразвукових пеленгаторів сигналів на основі перетворення формули з визначення дальності пасивної радіолокації. Відмічено, що необхідна дальність дії пасивних пеленгаторів досягається істотно меншими енергетичними витратами. На основі проведеного аналізу в рамках дослідження сформульовані особливості функціонування інфразвукових сенсорів. Так, наголошено, що інфразвуковий сенсор через особливості розповсюдження інфразвукових сигналів у просторі може забезпечити більш раннє виявлення цілі у порівнянні з часом захоплення цілі радіолокаційною станцією, яка працює в активному режимі на випромінювання. Запропоновано рішення щодо можливості використання в мобільній пасивній радіолокаційній станції набору з трьох інфразвукових сенсорів (рис. 2). Цей прийом дозволяє швидше розв'язати задачу пасивної локації, адже збільшується при цьому і точність визначення координат і кількість інформаційних каналів, які надають інформацію про цілі. Визначено положення, які слід враховувати під час виявлення повітряних об'єктів, що рухаються на низьких висотах. Зокрема, оцінка ефективності роботи традиційної радіолокаційної станції вимагає врахування екрануючої дії місцевості. За використання ж інфразвукових сенсорів така оцінка місцевості не є основною під час розв'язання задачі локації.

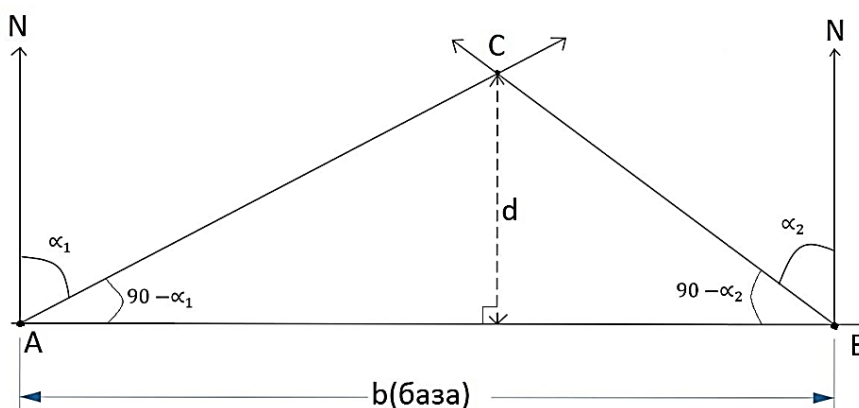


Рис. 3. Метод визначення відстані до цілі

Список літератури:

1. Бердышев В.П. Радиолокационные системы. Красноярск : «СФУ», 2012. 402 с.
2. Дудник П.И. Многофункциональные радиолокационные системы. Москва : «Дрофа», 2007. 283 с.
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Москва : «Радиотехника», 2007. 376 с.
4. Пятко С.Г., Красов А.И. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Санкт-Петербург : «Политехника», 2004. 446 с.
5. Ботов М.И., Вяхирев В.А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск : «СФУ», 2013. 530 с.
6. Соколов А.В. Вопросы перспективной радиолокации. Москва : «Радиотехника», 2003. 512 с.
7. Ботов М.И. Введение в теорию радиолокационных систем. Красноярск : «СФУ», 2012. 346 с.

Orlov A.T., Trapezon K.O. INVESTIGATION OF FEATURES OF INFRASOUND SENSORS IN THE DETECTION OF AIR OBJECTS

There are two approaches to detecting air objects in classical location theory. The first approach involves estimating the electric field strength along the flight path of the aircraft. The second approach is to evaluate the radiation from the aircraft based on the operation of a mobile passive radar station and a set of infrasound sensors. A technical solution for the combination of a passive direction finder and an active radar rangefinder in aircraft detection is proposed. This method allows you to quickly solve the problem of location and determine the coordinates and trajectory of the aircraft. The requirements for infrasonic signal direction finders based on the transformation of the formula for determining the range of passive radar are analyzed. It is noted that the required range of passive direction finders is achieved by significantly lower energy costs. On the basis of the conducted analysis within the limits of research features of functioning of infrasound sensors are formulated. Thus, it is emphasized that the sensor due to the peculiarities of the propagation of infrasonic signals in space can provide earlier detection of the target in comparison with the operation of a standard radar station that works on radiation. A solution for the possibility of using a set of infrasonic sensors in a passive radar station is proposed. This technique allows you to solve the problem of passive location faster, because it increases the accuracy and number of information channels that provide information about the goal. The provisions that should be taken into account when detecting air objects moving at low altitudes have been identified. In particular, the assessment of the efficiency of a traditional radar station requires consideration of the shielding action of the area. When using infrasonic sensors, such an assessment of the terrain is not the main one in solving the problem of location.

Key words: location, direction finder, signal, sensor, interference, infrasound, mobile radar station.