

СЕКЦИОНИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО СО СВЕРХБОЛЬШОЙ ЗОНОЙ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ

А.Е. МАРТИРОСЯН¹, П.Г. МУЖИКЯН^{1*},
В.А. МАРТИРОСЯН², Р.Б. КОСТАНЯН¹

¹Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

²Paris-Saclay University, Orsay, France

*e-mail: pmuzhikyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 16 октября 2025 г.)

Представлено устройство для обнаружения и определения местоположения людей на большом расстоянии в тепловом инфракрасном диапазоне со сверхбольшой зоной наблюдения. Устройство состоит из восьми конических рупорных элементов и соответствующих тепловых датчиков. Взаимное расположение этих элементов таково, что углы обзора соседних элементов частично перекрываются. Теоретическое рассмотрение вопроса позволило найти наиболее подходящее решение для углов наклона между соседними рупорными элементами, при котором температурный профиль угловой регистрации объектов практически равномерно распределяется по углам при общем обзоре 110° . Это дало возможность оптимальным образом спроектировать расположение рупорных элементов в устройстве с точки зрения обнаружения и нахождения местоположения людей с дальностью обнаружения до 30 м и зоной наблюдения по горизонтали до 863.9 м^2 . Уровень суммы тепловых сигналов от двух соседних датчиков позволяет оценить расстояние до человека, а их отношение определяет угол наблюдения.

1. Введение

Системы обнаружения объектов в тепловом инфракрасном диапазоне играют важную роль в устройствах ночного видения, безопасности, наблюдения людей и объектов. Изучению различных аспектов обнаружения человека с помощью тепловых датчиков или систем датчиков посвящено множество работ. В работе [1] представлена система обнаружения движения человека на основе пассивных инфракрасных датчиков (PIR) и методов машинного обучения для определения расстояния до него, направления и скорости движения. В [2] проводятся эксперименты по регистрации аналогового выходного сигнала датчика, соответствующего перемещению объекта через поле зрения датчика на разных расстояниях. Модели распознавания местоположения и активности человека с использованием пассивных инфракрасных датчиков и алгоритмов машинного обучения разработаны в [3]. В работе [4] продемонстрирована система, настроенная на оценку количества людей в различных временных интервалах. Используя аналоговые данные и искусственную нейронную сеть [5], замкнутое пространство классифицируется по количеству людей. Разработан PIR датчик с

вращающимся затвором для обнаружения и локализации присутствия людей [6]. В работе [7] наблюдаются маршруты передвижения пожилых людей в умном доме с использованием датчиков PIR. Установив систему, описанную в [8], пожилые люди могут определять скорость своей ходьбы, ведя повседневную жизнь. Датчики PIR оценивают здоровье людей, оценивая частоту сердечных сокращений в состоянии покоя [9], и обнаруживают эпилептические приступы в режиме реального времени [10]. В обзоре [11] подробно рассматривается применение различных методов, алгоритмов машинного обучения и конфигураций пассивных инфракрасных датчиков в среде умных зданий. Разработанные на сегодняшний день приборы на основе PIR техники могут работать как самостоятельно [12–14], так и вместе с видеосистемами наблюдения [15, 16]. Аналитическое исследование зависимостей усиления и угла обзора конических рупорных элементов от параметров конструкции проведено в [17, 18]. Возможности использования рупорных элементов с коническими и эллиптическими апертурами для обнаружения людей на больших расстояниях в тепловых инфракрасных системах описаны в работах [19–21].

В настоящей работе представлено устройство для обнаружения и определения местоположения людей, которое состоит из восьми рупорных элементов с соответствующими тепловыми датчиками. Рассмотренная конструкция обеспечивает сверхбольшую зону наблюдения по горизонтали, составляющую 863.9 м^2 .

2. Методы

Как показано в работах [19, 20], использование тепловых инфракрасных датчиков с коническими рупорными элементами для концентрации излучения существенно увеличивает дальность наблюдения и поле зрения системы для обнаружения людей. Для наглядности на рис.1 представлена общая схема для определения местоположения человека с использованием трех рупорных элементов и датчиков, расположенных под углом γ относительно соседнего элемента в горизонтальной плоскости. Для исключения ненаблюдаемых зон угловой наклон между соседними парами выбирается так, чтобы их углы обзора частично перекрывались. Жирными линиями (без стрелок) обозначены границы поля зрения рупорных элементов, а пунктирными линиями – их оси. Рассмотрим случай, ко-

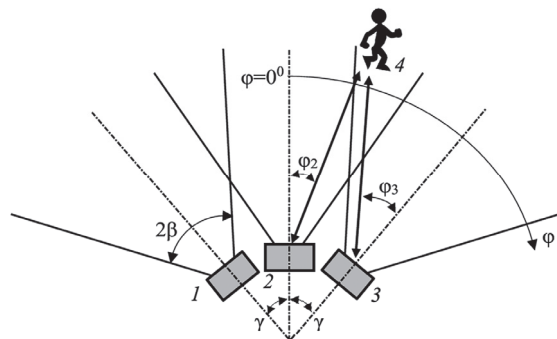


Рис.1. Схематическое изображение системы регистрации: 1, 2 и 3 – местоположение пар рупорных элементов и датчиков, 4 – наблюдаемый объект, 2β – угол обзора рупорного элемента.

гда объект находится одновременно в поле зрения двух соседних рупорных элементов, например 2-го и 3-го. На рис.1 жирными линиями со стрелками указаны направления обнаружения объекта этими элементами, φ_2 и φ_3 – соответствующие углы наблюдения относительно их осей, а φ – координата углового наблюдения в горизонтальной плоскости с центром на оси системы с тремя парами рупорных элементов и датчиков.

Рассмотрим систему наблюдения за объектом в координатах (φ, T) (рис.2), где T характеризует угловые профили температурных сигналов от датчиков 1–3 при наблюдении за объектом на постоянном расстоянии. Предложена математическая модель, когда сумма сигналов от соседних датчиков, одновременно регистрирующих объект при различных φ , практически не меняется. Представим угловую чувствительность регистрации температурного сигнала для пар рупорных элементов и датчиков в виде гауссовского распределения с угловой полушириной β , которая характеризует угол обзора рупорного элемента. Такой подход применим, исходя из хорошего соответствия результатов эксперимента по углу обзора [20] и профиля усиления [18] соответствующего рупорного элемента с расчетными данными гауссовского распределения (см. рис.3). Исходя из этого, для пар 2 и 3, наблюдающих объект (рис.1), угловые профили регистрируемых температурных сигналов от него могут быть представлены в виде:

$$T_2 = T_0 \exp\left[-\frac{\varphi^2}{2\beta^2}\right], \quad (1)$$

$$T_3 = T_0 \exp\left[-\frac{(\varphi-\gamma)^2}{2\beta^2}\right], \quad (2)$$

где T_0 – максимальный уровень температурного сигнала датчика при нахождении объекта на оси соответствующего рупорного элемента. Угол наклона γ между соседними парами можно выбрать таким образом, чтобы профили температурных сигналов для пар 2 и 3 пересекались на уровне полувысоты от максимального сигнала – $T_0/2$ (см. рис.2). Тогда из уравнения (1) для 2-ой пары получаем:

$$T_0/2 = T_0 \exp\left[-\frac{(\gamma/2)^2}{2\beta^2}\right]. \quad (3)$$

Отсюда выводим γ :

$$\gamma = -2\beta \sqrt{2 \ln \frac{1}{2}} = 2\beta \sqrt{2 \ln 2}. \quad (4)$$

Подставляя γ в уравнение (2), находим нормированную сумму $k = (T_2 + T_3)/T_0$ сигналов температуры от соседних датчиков 2 и 3:

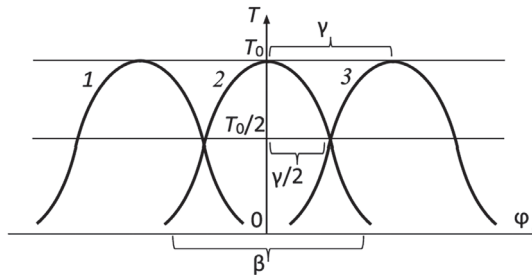


Рис.2. Профили угловой чувствительности датчиков 1–3, где T_0 – уровень максимального температурного сигнала, когда объект находится на оси одного из рупорных элементов, φ – угловая координата.

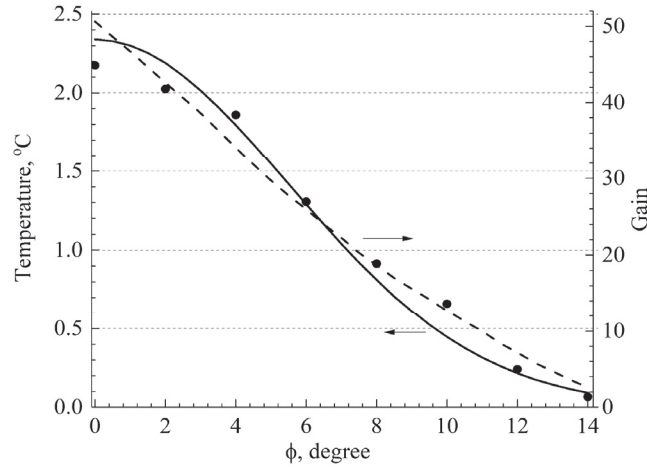


Рис.3. Зависимость температурного выходного сигнала датчика при расстоянии 6 м от человека от угла наблюдения ϕ рупорного элемента с углом у вершины 16° (кружки) [20] и соответствующего гауссовского распределения при $\beta = 5.5^\circ$ и $T_0 = 2.34$ (сплошная кривая). Пунктирная кривая показывает профиль усиления рупорного элемента (шкала справа) с углом у вершины 16° от угла наблюдения по расчетам от [18].

$$k = \left\{ \exp\left[-\frac{\varphi^2}{2\beta^2}\right] + \exp\left[-\frac{(\varphi - 2\beta\sqrt{2\ln 2})^2}{2\beta^2}\right] \right\}. \quad (5)$$

На рис.4а показано распределение суммы k от ϕ в угловом интервале $0-\gamma$. Мы можем констатировать, что эта сумма относительно стабильна и варьирует в пределах $\pm 4\%$ по сравнению со средним значением 1.04. Таким образом, исходя из закона обратной пропорциональности уровня сигнала от квадрата расстояния до объекта температурная величина суммы сигналов $kT_0 = T_2 + T_3$ может использоваться для оценки расстояния до объекта при произвольном угле наблюдения ϕ в угловом интервале $0-\gamma$.

С другой стороны, мы можем воспользоваться отношением этих сигналов $j = T_2/T_3$ для определения угла наблюдения ϕ в зависимости от этого отношения. Разделив уравнение (1) на уравнение (2), находим

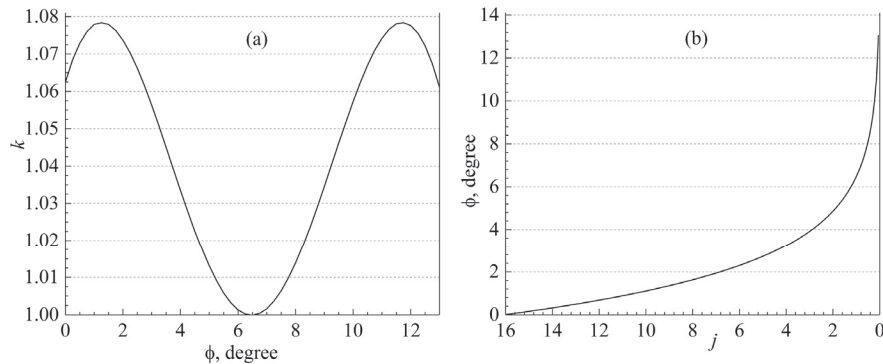


Рис.4. (а) Аналитический профиль нормированной суммы k сигналов температуры соседних пар (с углом у вершин рупорных элементов 16°) по ϕ в угловом интервале $0-\gamma$ при $\beta = 5.5^\circ$. (б) Аналитический профиль ϕ в зависимости от j при угле у вершин элементов 16° и $\beta = 5.5^\circ$.

$$j = \exp \left[\frac{-\varphi^2 + (\varphi - \gamma)^2}{2\beta^2} \right] = \exp \left[\frac{\gamma^2 - 2\gamma\varphi}{2\beta^2} \right]. \quad (6)$$

После преобразования уравнения (6) получаем формулу распределения φ в зависимости от j :

$$\varphi = \frac{\gamma}{2} - \frac{\beta^2}{\gamma} \ln j, \quad (7)$$

Подставляя γ из уравнения (4) в уравнение (7), окончательно находим

$$\varphi = \beta\sqrt{2 \ln 2} - \frac{\beta}{2\sqrt{2 \ln 2}} \ln j, \quad (8)$$

На рис.4b приведена зависимость φ от j для рупорных элементов, используемых в системе. Очевидно, что полученные результаты можно применить к любым соседним рупорным элементам в устройстве. Эти данные легли в основу конструкции и работы секционированного устройства для обнаружения и определения местоположения людей.

3. Конструкция секционированного устройства и обсуждение его характеристик

Горизонтальное расположение восьми конических рупорных элементов в устройстве показано на рис.5а, где серым цветом обозначены модули тепловых датчиков MLX90614. Угол при вершине и длина каждого элемента составляют 16° и 90 мм, соответственно. Мы выбрали $\gamma = 13^\circ$ для углов наклона соседних рупорных элементов, что примерно соответствует вычисленному значению из уравнения (4) – $\gamma = 12.96^\circ$. Вид устройства спереди представлен на рис.5b. В качестве входных окон рупоров устройства используется полиэтиленовая пленка толщиной ~ 0.1 мм, которая, согласно эксперименту, поглощает около 16% теплового инфракрасного излучения.

Каждый датчик в приборе управляется отдельно. Плата Arduino непрерывно собирает данные с датчиков и передает их на компьютер. Специальная программа на Python позволяет регистрировать увеличение сигналов по шкале температуры относительно фонового значения при появлении в поле зрения прибора относительно горячего объекта. Программа работает по следующим принципам:

- если объект обнаружен только одним из датчиков, программа предполагает, что он находится на оси соответствующего рупорного элемента;
- если объект обнаружен одновременно двумя соседними датчиками, программа вычисляет сумму температурных сигналов от них $kT_0 = T_2 + T_3$ и

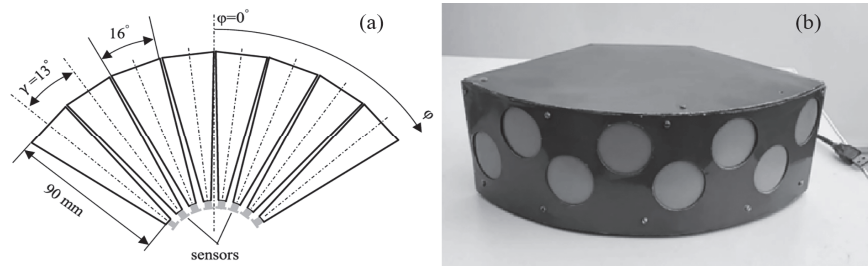


Рис.5. (а) Схематическое представление устройства с горизонтальным расположением рупорных элементов с углами у вершин 16° и длинами 90 мм: $\gamma = 13^\circ$ – угол наклона между соседними элементами и φ – угловая координата наблюдения. (b) Вид устройства спереди. Размеры: $21.7 \times 7.4 \times 11.9$ см.

определяет расстояние до объекта исходя из величины суммы;

- для определения угла наблюдения объекта используется отношение температурных сигналов от соседних датчиков $j = T_2/T_3$;
- исходя из значений kT_0 и j осуществляется определение местоположения объекта.

Секционированное устройство позволяет обнаруживать людей на расстоянии до 30 м. На рис.6 показана зависимость температурного сигнала от угла наблюдения человека на расстоянии 6 м. Наблюдается относительно однородный угловой профиль в пределах угла обзора устройства, который составляет $\sim 110^\circ$. Помимо цифровых данных об угле наблюдения и расстоянии до человека, информация также отображается на экране компьютера в виде визуального изображения.

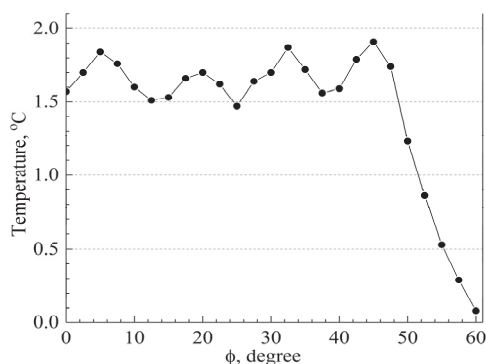


Рис.6. Зависимость температурного сигнала устройства от угла наблюдения человека ϕ на расстоянии 6 м.

В табл.1 представлены результаты характеристик разработанной системы и данные по различным устройствам. Таким образом, зона покрытия разработанной системы существенно превышает таковую у представленных устройств.

Табл.1. Сравнение характеристик существующих устройств с разработанной системой, описанной в данной работе

Ссылки	Дальность обнаружения, м	Угол обзора, градус	Зона наблюдения*, м ²	Размеры, мм
[12]	12	180	226.2	203×81×109
[13] Режим широкого обзора	12	85	106.8	115×62×50
[13] Режим дальнего обнаружения	18	10	28.3	115×62×50
[14] PRO-E-18W	21	70	269.4	358×188×290
[14] PRO-E-100	120	1.29	162.1	358×188×290
[15]	10	90	78.5	∅100×102
[16]	10	-	-	∅100×100
[19]	25	52	283.6	∅20×25
Данная работа	30	110	863.9	217×74×119

*Зона наблюдения определяется как секторная область с радиусом, равным дальности обнаружения, а угол сектора — горизонтальным углом обзора.

4. Заключение

В работе описывается секционированное устройство для обнаружения и локализации людей и относительно горячих объектов в тепловом инфракрасном диапазоне. Основными преимуществами представленного устройства являются:

- широкий угол обзора (110°) и возможность обнаружения людей на большом расстоянии (30 м);
- сверхбольшая зона наблюдения (863.9 м^2), что в несколько раз превышает результаты устройств, приведенные в цитируемых работах;
- возможность определения местоположения обнаруженных объектов из одной точки пространства (без перекрёстного наблюдения с нескольких устройств);
- возможность оценки направления и скорости движущихся объектов во временном масштабе;
- возможность работы как в помещениях, так и на открытом пространстве.

Описанное секционированное устройство может работать как самостоятельно, так и совместно с видеосистемами обнаружения и слежения в целях безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **J. Yun, S.S. Lee.** Sensors, **14**, 8057 (2014).
2. **B. Mukhopadhyaya, S. Srirangarajana, S. Kar.** Sens. Actuators A: Phys., **279**, 65 (2018).
3. **J. Zhang, T. Zhao, X. Zhou, J. Wang, X. Zhang, C. Qin, M. Luo.** Build. Simul., **15**, 1133 (2022).
4. **Y.P. Raykov, E. Ozer, G. Dasika, A. Boukouvalas, M.A. Little.** International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp 16), Heidelberg, Germany, 1133–1144, 2022.
5. **J. Andrews, M. Kowsika, A. Vakil, J. Li.** IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Portland, USA, 1295–1304, 2020.
6. **L. Wu, Y. Wang, Haili Liu.,** IEEE Sens. J., **18**, 8656 (2018).
7. **M. Gochoo, T.-H. Tan, V. Velusamy, S.-H. Liu, B. Damdinsuren, W.-C. Yeh.** IEEE Sens. J., **18**, 390 (2018).
8. **T. Utsumi, M. Hashimoto.** 13th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), Ayutthaya, Thailand, 1–5, 2021.
9. **H. Kapu, K.B. Saraswat, Y. Ozturk, A.E. Cetin.** Infrared Phys. Technol., **85**, 56 (2017).
10. **O. Hanosh, R. Ansari, K. Younis, A.E. Cetin.** IEEE Sens. J., **19**, 6467 (2019).
11. **A. Shokrollahi, J.A. Persson, R. Malekian, A. Sarkheyli-Hägele, F. Karlsson.** Sensors, **24**, 1533 (2024).
12. Honeywell, 5800PIR-OD2: <https://www.alarmgrid.com/products/honeywell-5800pir-od2> .
13. Optex, WNX-40IX: <https://www.optexamerica.com/products/intrusion-detection/wnx-40ix> .
14. Vanderbilt, AI Technology Innovation Co. Ltd.: https://www.aitechno.co.th/products/intrusion/external_motion_detectors.html .
15. Swann, Security Cameras SWPRO-4KDOMEPK2: <https://uk.swann.com/swpro-4kdomepk2/?srsltid=AfmBOor9rgQl5Q293M-BXrBbMSRibYwDb4UjNYrzXPjtC-4pwCXrBheT> .
16. Concord, 4K NVR Dome PIR Camera: <https://www.jaycar.com.au/concord-4k-pir-dome-ip-camera/p/QC5730> .

17. V.A. Martirosyan, P.H. Muzhikyan. Appl. Opt., **60**, 5382 (2021).
18. A.E. Martirosyan, P.H. Muzhikyan, V.A. Martirosyan, R.B. Kostanyan. Sens. Imaging, **25**, 28 (2024).
19. A.E. Martirosyan, R.B. Kostanyan, V.A. Martirosyan, P.H. Muzhikyan. Sens. Imaging, **24**, 41 (2023).
20. A.E. Martirosyan, R.B. Kostanyan, V.A. Martirosyan, P. H. Muzhikyan. Opt. Eng., **63**, 044101 (2024).
21. А.Е. Мартиросян, П.Г. Мужикян, В.А. Мартиросян, Р.Б. Костанян. Известия НАН Армении: Физика, **60**, 121 (2025).

ՍԵՎՅԻԱՎՈՐ ՍԱՐՔ ԴԻՏԱՐԿՄԱՆ ԳԵՐՄԵԾ ՏԻՐՈՒՅԹՈՎ՝ ՄԱՐԴԿԱՆՑ
ՀԱՅՏՆԱԲԵՐՄԱՆ ԵՎ ՏԵՂԱՅՆԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Ա.Ե. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Պ.Հ. ՄՈՒԺԻԿՅԱՆ, Վ.Ա. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ռ.Բ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

Հոդվածում ներկայացված է ջերմային ինֆրակարմիր տիրություն մեծ հեռավորության վրա մարդկանց հայտնաբերման և տեղայնացման սարք, որն ունի դիտակման գերմեծ տիրույթ: Սարքը բաղկացած է ութ կոնաձև եղջյուրանման տարրերից և համապատասխան ջերմային սենսորներից: Եղջյուրանման տարրերը տեղադրված են այնպես, որ հարակից տարրերի դիտակման անկյունները մասամբ վերածածկվում են: Հարցի տեսական դիտարկումը թույլ է տվել գտնել հարակից եղջյուրանման տարրերի անկյունային փոխդասավորության այնպիսի լուծում, որի արդյունքում օբյեկտների դիտարկման ջերմաստիճանային պրոֆիլը գրեթե հավասարաչափ է բաշխված՝ $\sim 110^\circ$ ընդհանուր անկյունային տեսադաշտով: Վերջինս հնարավորություն է տվել օպտիմալ կերպով նախագծել եղջյուրանման տարրերի դասավորությունը սարքում՝ մարդկանց առավել արդյունավետ եղանակով հայտնաբերելու և տեղայնացնելու տեսանկյունից, և ապահովել սարքի մինչև 30 մ հայտնաբերման հեռավորություն ու 863.9 m^2 հորիզոնական դիտարկման տարածք: Երկու հարակից սենսորների գրանցած ջերմային ազդանշանների գումարային մակարդակը թույլ է տալիս գնահատել հեռավորությունը, իսկ հարաբերությունը որոշում է դիտարկման անկյունը:

SECTIONAL DEVICE WITH AN ULTRA-LARGE COVERAGE AREA
FOR HUMAN DETECTION AND LOCALIZATION

A.E. MARTIROSYAN, P.H. MUZHIKYAN, V.A. MARTIROSYAN, R.B. KOSTANYAN

The article presents a device for detecting and localizing humans over long distances in the thermal infrared region, featuring an ultra-large coverage area. The device consists of eight conical horn elements and corresponding thermal sensors. The horns are positioned in such a way that the angle of view of adjacent elements partially overlaps. Theoretical considerations made it possible to find a suitable solution for the angles between adjacent horns, resulting in an almost uniformly distributed angular detection profile with a total angle of view of 110° . This made it possible to optimally design the arrangement of the horn elements in the device to effectively detect and localize humans, while the detection range of the device is 30 m and the horizontal coverage area is 863.9 m^2 . The summed level of thermal signals from two adjacent sensors allows estimation of the distance to a human, and their ratio determines the observation angle.