

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ШУМА В РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2013 г. С. И. Ивашов¹, А. С. Бугаев^{2,3}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5
E-mail: sivashov@rslab.ru

²Московский физико-технический институт (Государственный университет)
Российская Федерация, 141700 Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 7

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

Поступила в редакцию 27.03.2013 г.

Проведен анализ влияния атмосферных условий на распространение электромагнитных волн миллиметрового и терагерцового диапазонов. Показано, что в терагерцовом диапазоне затухание в атмосфере и материалах одежды достигает максимального значения в электромагнитном диапазоне и значительно превышает аналогичные параметры для миллиметровых волн. Предложен алгоритм обработки изображений, регистрируемых радиометрическим датчиком, работающим совместно с шумовым генератором. Показано, что совместная обработка изображений, полученных в пассивном и активном режимах работы радиометра, позволяет повысить вероятность обнаружения скрытых объектов.

DOI: 10.7868/S0033849413090052

Последние достижения в области оптоэлектроники и высокочастотных компонент и устройств позволили перейти к разработке и проектированию устройств миллиметрового и терагерцового диапазонов длин волн. Освоение нового поколения элементной базы дало возможность создать сканирующие радиолокационные устройства, которые предназначены для досмотра пассажиров в аэропортах [1, 2]. Не менее острой, как показали события последнего времени, является потребность досмотра пассажиров, которые используют общественный наземный транспорт (метро, автобусы, поезда и др.). Это объясняется тем обстоятельством, что проблема защиты авиационного транспорта от террористических атак в значительной степени считается решенной: за последние годы в результате принятых мер по повышению безопасности не было осуществлено сколь-нибудь значительных терактов на воздушном транспорте. При проверке пассажиров в аэропортах при прохождении досмотровых камер их просят снять верхнюю одежду, которая препятствует распространению микроволнового излучения, а сама процедура досмотра может занимать достаточно много времени. Задача защиты наземного пассажирского транспорта является более сложной, поскольку необходимо провести досмотр

людей в верхней одежде и при этом не создавать препятствий для перемещения большого потока пассажиров.

Затухание электромагнитного излучения A в различных типах тканей, применяемых для пошива одежды, увеличивается с ростом частоты f [1]. На рис. 1а, 1б и 1в приведены, полученные разными авторами, зависимости для трех типов тканей. Результаты на графиках (рис. 1а, 1б) отличаются столь незначительно, что легко объясняется различными условиями эксперимента (например, использованием различных фактур тканей).

В воздухе зависимость поглощения от частоты не является монотонной (окна “прозрачности” сменяются окнами “поглощения”), но общая тенденция сохраняется — с ростом частоты увеличивается и затухание, особенно высоким оно является в терагерцовом диапазоне 1...10 ТГц (рис. 2) [3, 4]. Необходимо отметить, что основной вклад в поглощение излучения на частотах выше 30 ГГц вносит вода и ее пары. В терагерцовом диапазоне по данным NASA JPL находится около 900 линий поглощения воды, которые и обуславливают высокий уровень поглощения излучения в этом диапазоне. На рис. 3 приведены данные по поглощению для условий стандартной атмосферы при влажности 7.5 г/м³ и повышенной влажности при

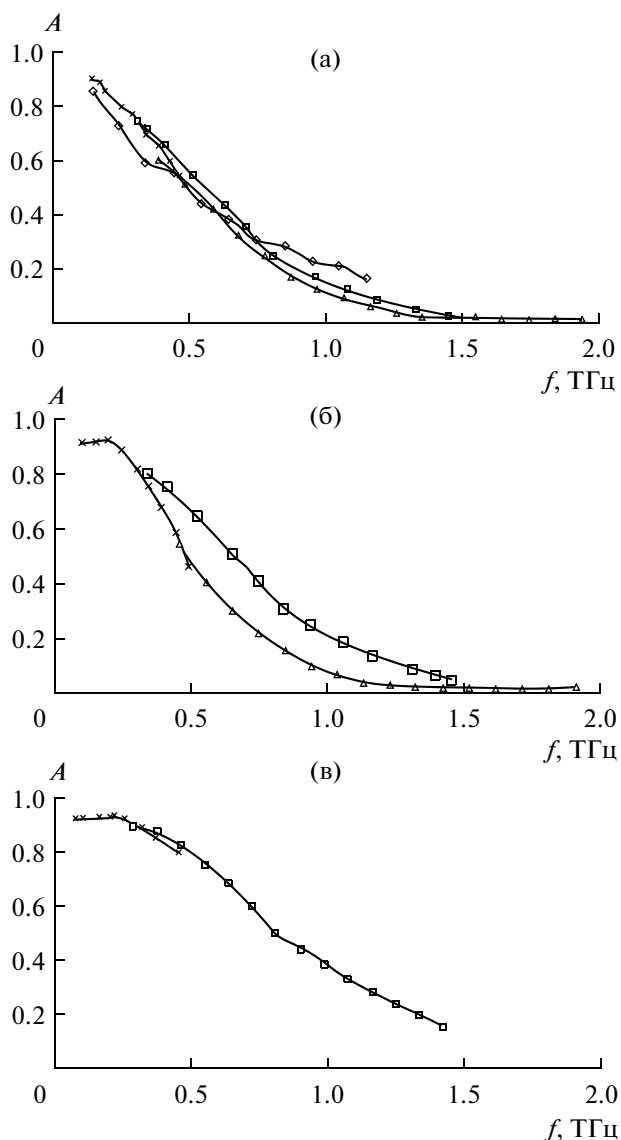


Рис. 1. Прохождение электромагнитных волн миллиметрового и терагерцового диапазонов через одежду из разных типов ткани: джинсовый костюм (а), спортивный костюм (б) и футболка (в) [1]. На рисунке приняты следующие обозначения: Δ по данным [20], \square – [21], \diamond – [22].

15 г/м^3 , а также в тумане и при дожде [1]. Высокий уровень поглощения в области частот выше 1 ТГц в значительной мере затрудняет создание детектирующих устройств, работающих в открытом пространстве на дальностях, превышающих несколько метров.

За последние годы для обнаружения скрытых объектов были сконструированы несколько типов устройств как активных (радиолокаторы) [2, 5, 6], так и пассивных (радиометры) [7, 8]. Преимущества и недостатки этих двух технологий достаточно подробно обсуждались в работах [9, 10]. В некоторых случаях радиолокационные и радио-

метрические устройства используются совместно для улучшения качества и объема регистрируемой информации [11, 12].

Еще одной возможностью является использование активно-пассивного радиометра [16, 17]. Он состоит двух частей: пассивной (самого радиометра) и активной (генератора шума – “подсвет”). Идеальный шумовой генератор излучает сигнал, спектр которого равномерно заполняет рабочий диапазон частот. Такой шумовой сигнал называется “белым”, если спектр является неравномерным, то он называется “цветным”. Следует отметить, что использование широкополосного шумового генератора в активно-пассивной системе является принципиальным, так как при применении монохроматического подсвета происходит когерентное сложение отраженного от объекта сигнала и сигнала, непосредственно распространяющегося по боковым лепесткам диаграммы направленности из антенны генератора шума в приемную антенну радиометра. Проведенные эксперименты с монохроматическим генератором подсвета показали, что зарегистрированные изображения в действительности не имеют ничего общего с обозреваемой местностью и состоят из отдельных, хаотически расположенных пятен.

Еще одним требованием, выдвигаемым к генератору шума, является совпадение рабочих диапазонов радиометра и подсвета, поскольку в противном случае работа генератора шума не окажет никакого влияния на регистрируемые радиометром изображения.

Радиотеплолокация, так же как и классическая радиолокация, предназначена для определения координат удаленных объектов. Основное отличие заключается в том, что в радиолокации в качестве источника излучения, подсвечивающего цель, используется излучение, генерируемое самой радиолокационной станцией и отраженное целью, а при обнаружении объектов радиотеплолокатором регистрируется излучение, генерируемое самим объектом, а также излучение фона, отраженное им. В этом отношении радиотеплолокация близка к пассивным инфракрасным датчикам обнаружения, однако в качестве рабочего диапазона длин волн используется радиодиапазон. (В литературе радиотеплолокаторы для краткости называют радиометрами [13, 18]).

Известно, что тепловое излучение тел является сверхширокополосным. В квантовой механике зависимость плотности излучения R_0 от его частоты и температуры для абсолютно черного тела выражается формулой Планка [13]:

$$R_0 = \frac{2\pi f^3 h}{c^2 \left\{ \exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1 \right\}}, \quad (1)$$

где $h = 6.62 \times 10^{-34}$ [Дж с] – постоянная Планка; $c = 3 \times 10^8$ [км/с] – скорость распространения

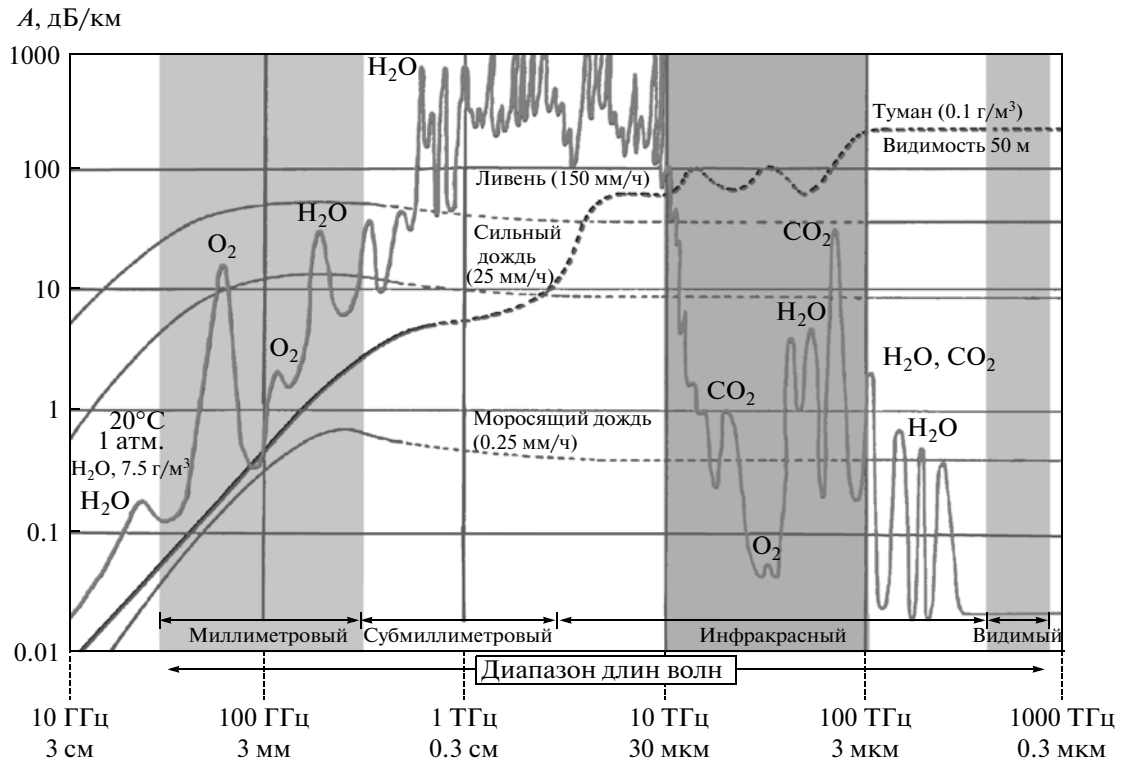


Рис. 2. Затухание волн миллиметрового, субмиллиметрового и терагерцового диапазонов в атмосфере и атмосферных осадках.

электромагнитных волн в вакууме; $k = 1.38 \times 10^{-23}$ [Дж/град] — постоянная Больцмана; T [К] — абсолютная температура излучающего тела; f [Гц] — частота; R_0 — спектральная плотность излучения, равная мощности, излученной на частоте f в полосе 1 Гц с 1 м^2 излучателя.

Частота f_m , на которой спектральная плотность излучения имеет максимум, определяется законом смещения Вина:

$$f_m = 1.03 \times 10^{11} T. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) следует, что при температуре окружающей среды, близкой к 300 К, максимум излучения приходится на инфракрасную часть электромагнитного спектра, а ее значение в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн в тысячи раз меньше. Благодаря этому инфракрасные датчики широко применяются для наблюдения в ночное время. Но с уменьшением температуры максимум излучения сдвигается в область более коротких длин волн. В качестве примера можно привести космическое реликтовое излучение, которое имеет спектр абсолютно черного тела с температурой 2.725 К. Максимум его излучения находится в миллиметровой области (длина волны 1.9 мм, которой соответствует частота 160.4 ГГц) [14].

Несмотря на относительно малую мощность теплового излучения в радиодиапазоне при температурах, характерных для окружающей среды, чувствительность современных радиоприемников такова, что данное излучение может приниматься на относительно больших расстояниях [7]. Хотя наличие атмосферных осадков может в значительной мере повлиять на максимальную дальность обнаружения [3].

Формула (1) дает спектральную плотность излучения R_0 для так называемого абсолютно черного тела, т.е. идеального излучателя. Для реальных тел в этом случае необходимо делать поправку на «степень черноты». В этом случае

$$R = \alpha R_0, \quad (3)$$

где R — спектральная плотность излучения реального излучателя; $\alpha < 1$ — коэффициент поглощения, зависящий от частоты.

Отметим также, что в диапазоне температур, характерных для естественного состояния земной поверхности, нет необходимости в радиодиапазоне пользоваться достаточно сложной для вычислений формулой Планка. Учитывая, что в данном случае $hf/kT \ll 1$, и разлагая экспоненциальный

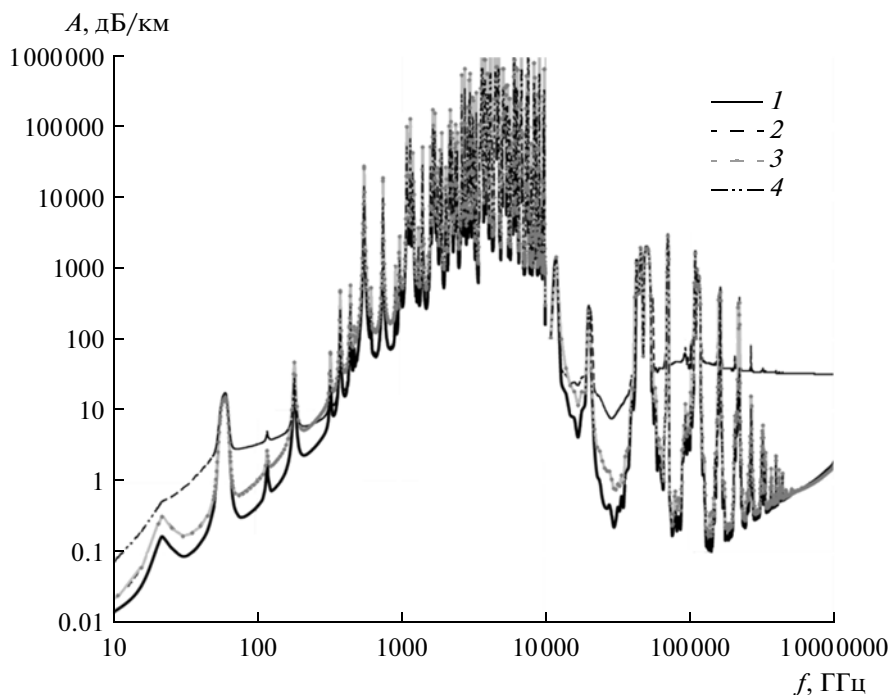


Рис. 3. Затухание электромагнитных волн для различных погодных условий: стандартная атмосфера: влажность 7.5 (1) и 15 г/м³ (2), осадки 4 мм/ч (3), туман при видимости 100 м (4).

член в ряд, уравнение (1) преобразуется к более простому виду (закон Рэля—Джинса)

$$R_0 = \frac{2\pi}{\lambda^2} kT, \quad (4)$$

где λ — длина волны излучения.

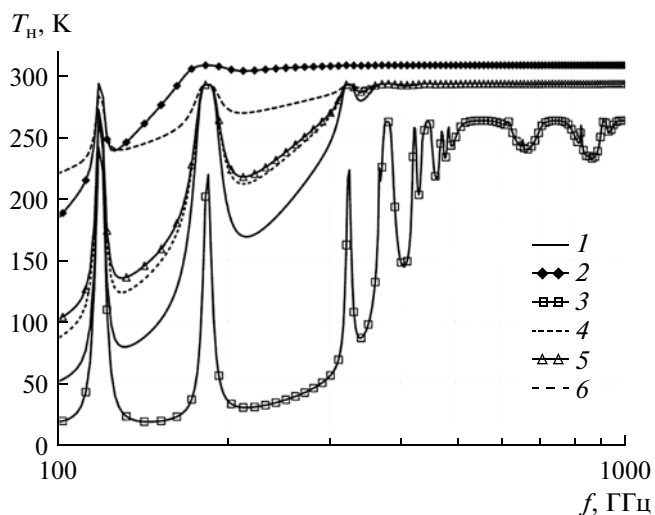


Рис. 4. Кажущаяся температура неба, измеряемая на уровне моря при различных погодных условиях: влажность воздуха 7.5 (1) и 15 г/м³ (2); зимнее безоблачное небо (3); туман (4); пылевая буря (5); дождь (6).

В радиотеплолокации для характеристики собственного излучения тела принято использовать понятие радиояркостной температуры $T_{я}$, которая равна произведению коэффициента поглощения на его абсолютную температуру. Это соотношение записывается аналогично (3):

$$T_{я} = \alpha T. \quad (5)$$

В реальных условиях поток излучения, принимаемый приёмником от исследуемого тела, кроме собственного излучения объекта будет содержать компоненту, связанную с переотражением внешнего излучения. Источником внешнего излучения может быть небо, радиояркостная температура которого в миллиметровом диапазоне ниже температуры земных покровов и зависит в значительной степени от состояния облачности и атмосферных осадков (рис. 4) [1, 19] и в меньшей степени от угла визирования [15]. При этом металлические объекты, которые хорошо отражают электромагнитное излучение, будут выделяться на фоне подстилающей поверхности более низкой радиояркостной температурой. На этом эффекте основана их естественная селекция [16, 17].

Кроме того, подсвет может осуществляться и от источника искусственного происхождения. Таким источником может быть генератор шумовых сигналов, излучающий в полосе приема радиометра. Суммарную спектральную плотность собственного излучения и отраженного при наличии

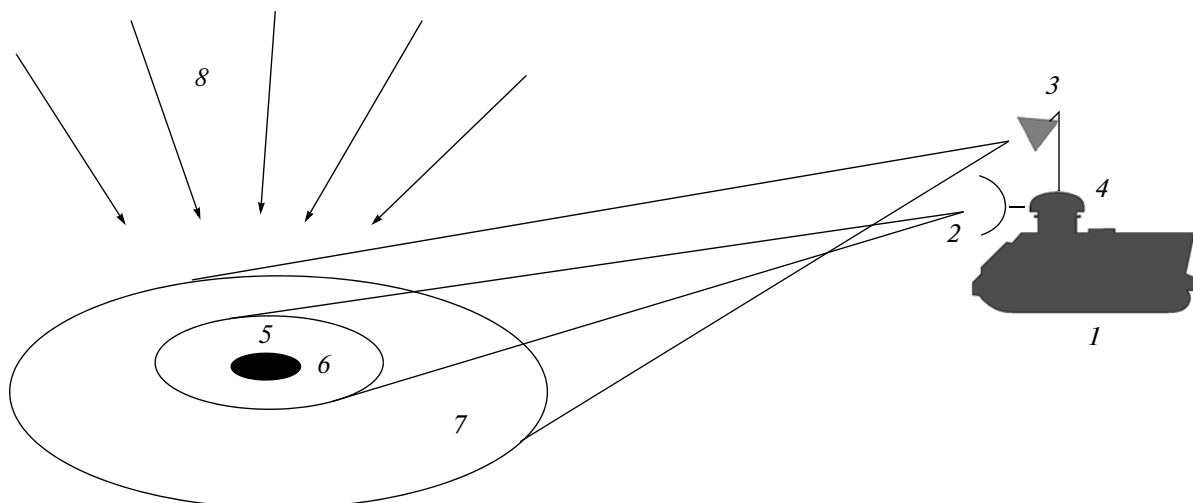


Рис. 5. Схема приема с наземного носителя радиометрических сигналов при различных источниках облучения; 1 – носитель аппаратуры, 2 – антенна радиометра, 3 – антенна генератора “шумового” подсвета, 4 – сканирующее устройство, 5 – объект наблюдения на поверхности земли, 6 – область наблюдения основного лепестка антенны радиометра на поверхности земли, 7 – область облучения поверхности земли антенной генератора шума, 8 – излучение неба.

естественных и искусственных источников подсвета R_{Σ} можно записать в виде

$$R_{\Sigma} = \frac{2\pi}{\lambda^2} k (\alpha T + \rho_n T_n + \rho_p T_p), \quad (6)$$

где ρ_n – коэффициент отражения телом излучения неба, T_n – радиояркость температура подсвечивающего излучения неба, ρ_p – коэффициент отражения телом излучения “подсвета”, T_p – радиояркость температура подсвечивающего излучения в полосе приема радиометра.

Схема приема радиометрических сигналов различной природы, излучаемых и отражаемых объектом, представлена на рис. 5. На этом рисунке приведена и возможная схема размещения радиометрических датчиков на наземном носителе, включающая шумовой генератор подсвета, диаграмма направленности главного лепестка антенны которого шире, чем у антенны радиометра. Генератор шума и радиометр соосно закреплены на сканирующем устройстве, которое обеспечивает просмотр полосы местности впереди движения наземного носителя по азимуту. Построчная развертка осуществляется за счет движения носителя. Такой выбор параметров и способ размещения устройств обеспечивает условие равномерной подсветки генератором шума участка поверхности земли, наблюдаемого антенной радиометра.

В общем случае коэффициенты отражения излучения неба ρ_n и подсвечивающего излучения ρ_p в (6) отличаются между собой. Это связано с формой отражающего тела. Так как излучение неба является рассеянным и более или менее равномерно подсвечивает объект из верхней полусферы, то и отраженное телом излучение будет всена-

правленным. Излучение же подсвета является сосредоточенным и направленным от генератора шума, и объект плоской формы может отражать его в сторону от приемной антенны радиометра. В этом случае ρ_p будет равен нулю.

Для проверки возможности обнаружения металлических объектов, установленных внаброс на поверхности земли, был разработан экспериментальный радиометрический комплекс миллиметрового диапазона, изображенный на рис. 6. Выбор диапазона был связан с тем, что в этом диапазоне при приемлемой апертуре антенны радиометра можно обеспечить достаточно высокий контраст объектов обнаружения, диаметр которых составлял около 30 см.

Комплекс включал в себя: радиометр 8-мм диапазона длин волн, генератор широкополосных шумовых сигналов того же диапазона и телевизионную камеру. Все эти устройства соосно были закреплены на механическом сканирующем устройстве, обеспечивающем сканирование в двух плоскостях – по углу места и азимуту. Тем самым обеспечивалась возможность просмотра участка местности с неподвижного носителя аппаратуры. Диаграмма направленности основного лепестка антенны радиометра составляла 1° , а для антенны генератора шумовых сигналов $\sim 10^\circ$. Относительное расположение антенн генератора и радиометра выбиралось таким образом, чтобы добиться минимального уровня прямого сигнала от генератора к радиометру. Телевизионная камера обеспечивала возможность для оператора сравнения получаемых изображений в радиодиапазоне и в видимом спектре.

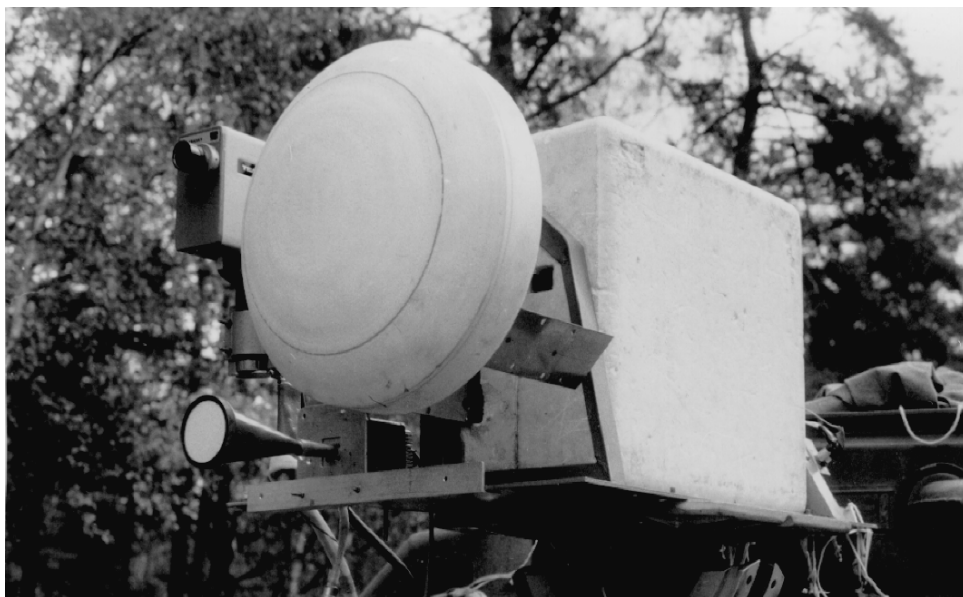


Рис. 6. Экспериментальный радиометрический комплекс.



Рис. 7. Фотоизображение сканируемой местности и объектов на ней.

Режим работы аппаратуры давал возможность последовательного получения двух радиометрических изображений: в пассивном режиме (с выключенным подсветом) и в активном режиме, когда генератор шума был включен. Фотоизображение снимаемой радиометром местности приведено на рис. 7. На переднем плане на поверхности грунта в шахматном порядке в три ряда были выложены

девять круглых металлических объектов. Ближайший к радиометрическому комплексу объект находился на расстоянии 10 м, а дальний — 22 м. Объекты в правом ряду для увеличения контраста были установлены на подставках и наклонены в сторону радиометра.

Параллельно полю с объектами, слева от него, в качестве репера была выложена металлическая

полоса. На заднем плане располагались ажурная металлическая вышка (в центре снимка) и строение с плоской металлической крышей (в левом верхнем углу).

Результаты съемки местности в пассивном режиме и в режиме с подсветом приведены на рис. 8 и 9 соответственно. Градации яркости на этих рисунках выбраны так, что объектам с более низкой радиометрической температурой соответствуют более темные участки изображения. Так как металлические объекты в радиодиапазоне имеют коэффициент отражения, близкий к единице, то, отражая излучение неба, радиояркая температура которого ниже температуры земных покровов, они на радиометрическом квазиизображении выглядят более темными.

На рис. 8 отчетливо видны ближайшие к радиометру объекты, а также объекты правого ряда, контраст которых выше. Виден также репер слева от поля с объектами, а на заднем плане отчетливо наблюдается металлическая крыша строения и виден силуэт вышки. Таким образом, при заданных параметрах радиометрического датчика в пассивном режиме контраст металлических объектов, установленных параллельно поверхности земли, достаточен для их обнаружения только на расстоянии до 15...20 м. На больших расстояниях их контраст находится на уровне естественных колебаний радиояркой температуры подстилающей поверхности.

При включенном шумовом генераторе изображение качественно изменяется (рис. 9). В этом случае контраст металлических объектов по отношению к фону зависит не только от их размеров, но и от формы наблюдаемых объектов. Так объекты плоской формы, зеркально отражающие излучение подсвета с высокой радиояркой температурой, по-прежнему видны на изображении, как объекты с низкой радиояркой температурой. Это объясняется тем, что в направлении антенны радиометра отражается только излучение неба. Такими объектами на изображении являются крыша строения и металлический репер.

Объекты же сложной формы, представляя собой набор "блестящих точек", отражают в направлении антенны радиометра излучение подсвета. Такие объекты на изображении поменяли контраст по отношению к фону. К ним относятся объекты, подлежащие обнаружению и ажурная вышка на заднем плане. Вместе с тем при использовании подсвета степень неоднородности фона возросла, что также затрудняет обнаружение.

Для селекции объектов сложной формы, какими и являются используемые объекты, был предложен алгоритм, работающий по схеме совпадений и выделяющий на изображениях (см. рис. 8 и 9) только те объекты, которые меняют свой контраст по отношению к фону при включении под-

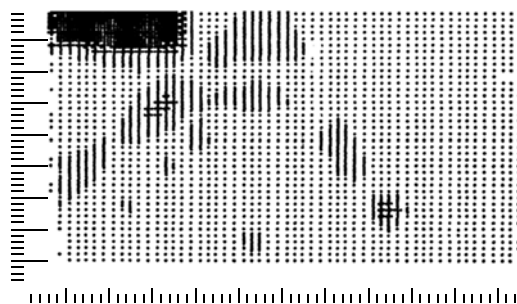


Рис. 8. Радиометрическое изображение местности в пассивном режиме.



Рис. 9. Радиометрическое изображение местности в режиме подсвета генератором шума.

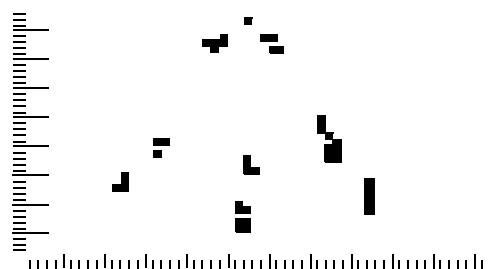


Рис. 10. Результат совместной обработки изображений, представленных на рис. 8 и 9.

света. Результат совместной обработки изображений рис. 8 и 9 по описанному алгоритму приведен на рис. 10. Анализ данного изображения показывает, что из выложенных девяти объектов обнаружены семь, а также видна вышка, как объект сложной формы. Все остальные предметы исчезли с изображения.

Другим возможным алгоритмом является алгоритм вычитания активного и пассивного изображений [17], который позволяет поднять контраст металлических объектов по отношению к фону. Однако предлагаемый в данной работе алгоритм, основанный на схеме совпадений, более эффективен, так как позволяет снизить уровень ложных тревог и не требует дополнительной обработки при принятии решений об обнаружении [16].

В заключение отметим, что предложенный метод обнаружения объектов, имеющих сложную форму, также можно использовать для других задач, например, для обнаружения оружия и взрывчатых веществ под одеждой человека. Для этого в режиме непрерывного просмотра стоящих или двигающихся людей подсвет должен работать в режиме стробоскопа. Таким образом, при выключенном генераторе шума и при заданном положении антенн радиометрического комплекса будет происходить регистрация элемента пассивного радиометрического изображения, а при включенном генераторе – активного. При соответствующем выборе частоты переключения режимов работы генератора шума можно добиться полного совмещения обоих изображений в процессе их последующей обработки. По сравнению с существующими пассивными радиометрическими комплексами использование шумового подсвета дает больше информации, так как в нем используется и информация, получаемая в пассивном режиме. В то же время в зависимости от обстоятельств комплекс может использоваться как в чисто пассивном, так и в активном режиме, когда генератор шума включен непрерывно. При этом наличие генератора шума в радиометрическом комплексе практически не сказывается на его стоимости, так как стоимость такого генератора значительно меньше стоимости самого радиометра.

Еще одним вопросом, заслуживающим внимания, является потенциальное влияние на здоровье людей, подвергающихся облучению при досмотре в активных радиолокационных системах [2]. Обычно принято считать, что достоинством пассивных радиометрических систем по сравнению с радиолокационными установками, широко применяемыми при досмотре людей в аэропортах, является их полная экологическая безопасность, так как какое-либо излучение в этих системах отсутствует. Наличие шумового генератора подразумевает и облучение людей. Однако, учитывая высокую чувствительность современных радиометров, уровень излучения генератора шума (при соответствующем выборе его мощности) на теле досматриваемого лица будет сравним с собственным излучением тела человека, что очевидно является абсолютно безопасным.

Авторы выражают благодарность О.Н. Линникову и Б.А. Юфрякову (НТЦ системного моделирования, Москва) за участие в выполнении экспериментальных работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследова-

ний (проект № 12-07-91371) и Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 7.340.2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Appleby R., Wallace H.B.* // IEEE Trans. 2007. V. AP-55. № 11. P. 2944.
2. *Sheen D.M., McMakin D.L., Lechelt W., McGriffin J.W.* // Proc. SPIE. 2005. V. 5789. P. 117.
3. *Preissner F.J.* // Symp. Millimeter and Submillimeter Wave Propagation and Circuits. AGARD Conf. Proc. 1972. № 245. P. 48/1.
4. *Yujiri L., Shoucri M.M., Moffa P.* // IEEE Microwave Magaz. 2003. V. 4. № 3. P. 39.
5. *McMakin D.L., Keller P.E., Sheen D.M., Hall T.E.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7309. P. 73090G.
6. *Cooper K.B., Dengler R.J., Llombart N. et al.* // IEEE Trans. 2008. V. MTT-56. № 2. P. 2771.
7. *Mann C.* // Proc. 2009 Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications, (ICEAA'09). N.Y.: IEEE, 2009. P.1013.
8. *Doyle R., Lyons B., Walshe J. et al.* // Proc. 34th European Microwave Conf. Louvaine-la-Neuve: European Microwave Association, 2004. P. 1285.
9. *Wallance H.B.* // Appl. Opt. 2010. V. 49. №19. P. E38.
10. *Wallace H.B., Rosker M.J.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7485. P. 74850E1.
11. *Bolten J.D., Lakshmi V., Njoku E.G.* // Geosci. Remote Sensing. 2003. V. 41. № 12. P. 2792.
12. *Yan Jin-Hai, Li Xing-Guo, Wang Ming* // Proc. 5th Int. Conf. on Inform. Fusion. N.Y.: IEEE, 2002. V. 2. P. 1416.
13. *Николаев А.Г., Перцов С.В.* Радиотеплолокация. М.: Воениздат, 1970.
14. *Fixsen D.J.* // Astrophys. J. 2009. V. 707. № 2. P. 916.
15. *Peichl M., Süß H., Dill S. et al.* // Proc. 1st European Radar Conf. Amsterdam. N.Y.: IEEE, 2004. P. 269.
16. *Dmitriyev A.A., Ivashov S.I., Sablin V.N., Ufraykov B.A.* // Proc. 5th Int. Conf. on Radar Systems. Session 1.7, May 17–21, 1999, Brest, France.
17. *Poradish F.J.* // Proc. IEEE National Aerospace and Electron. Conf. (NAECON'82). N.Y.: 1982. P. 1262.
18. *Быстров Р.П., Загорин Г.К., Соколов А.В., Федорова Л.В.* Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов. М.: Радиотехника, 2008.
19. *Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986.
20. *Gatesman A.J., Danylov A., Goyette T.M. et al.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6212. P. 62120E1.
21. *Dickinson J.C., Goyette T.M., Gatesman A.J. et al.* // Proc. SPIE. 2006. V. 6212. P. 6210Q1-1.
22. *Bjarnson J.E., Chan T.L.J., Lee A.W. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. № 4. P. 519.