

Радиометрическая подсветка ближней радиолокации

Павлюченко А. В.¹, Лошцицкий П. П.², Шеленговский А. И.¹, Бабенко В. В.¹

¹Государственный научно-исследовательский центр “Айсберг”, г. Киев, Украина

²Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт им. И. Сикоского”, г. Киев, Украина

E-mail: andy_pavluchenko@ukr.net

Представлены результаты исследований различных источников шумового излучения в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн для увеличения радиояркого контраста объектов и их использования в качестве подсветки в многоканальной радиометрической системе. Низкочастотная модуляция энергосберегающих ламп позволяет их использовать при построении модуляционных радиометрических систем мм диапазонов длин волн для дистанционного детектирования объектов. Плотность потока мощности шумовой панели ниже чем у энергосберегающих ламп, однако фронт излучаемой электро-магнитной волны становится практически плоским на расстоянии от нее 300-400мм.

Ключевые слова: ближняя локация; радиометрия; генераторы шума; подсветка

Введение

Для измерения параметров растворов, в зависимости от конкретных условий и требований, разработаны и используются различные методы измерений и приборы [1–3]. Методы измерения параметров растворов чаще всего основаны на изменениях, которые происходят с заданным зондирующим сигналом при его взаимодействии с измеряемой жидкостью.

подавляющая часть этих методов не может быть использована или приспособлена для дистанционного анализа жидкостей или растворов, из-за невозможности реализации непосредственного взаимодействия измеряемого раствора с измерительной аппаратурой. Задача усложняется, если жидкость или раствор находится в закрытой диэлектрической емкости (таре). В литературе встречаются единичные работы, посвященные данному вопросу [4].

Для бесконтактной диагностики жидких сред необходима разработка совершенно нового метода измерения физико-химических свойств растворов. В методе определения свойств раствора целесообразно использовать собственные спонтанные колебания жидкостей, которые являются результатом взаимодействия молекул раствора между собой при наличии броуновского движения. Спонтанные колебания молекул сами могут являться случайным зондирующим сигналом, измерения изменений которых связаны с параметрами исследуемой жидкости. Эти измерения оказываются возможными или в легко доступной промежуточной среде между аппаратурой и объектом исследования [5], или дистанционно, методом пас-

сивной радиолокации [6]. Под радиолокацией здесь подразумевается идентификация объектов, основанная главным образом на приеме их собственного или отраженного излучения зондирующего сигнала. В настоящей работе использован термин радиометрия, который понимается в значении микроволновая радиометрия в ближней радиолокации.

По своей физической сущности радиометрия занимает промежуточное положение между радиолокацией и инфракрасной техникой. Специфические особенности радиометрии позволяют решать задачи, принципиально неразрешимые средствами радиолокации и инфракрасной техникой — дистанционное измерение распределения температуры объектов и исследование их внутренней структуры.

Все тела, температура которых выше абсолютного нуля, излучают собственные слабые тепловые (шумовые) радиоизлучения, обусловленные колебаниями атомов и молекул вещества, из которого состоит тело. Интенсивность излучения может быть описана радиояркой температурой — $T_{я}$ эквивалентной температуре абсолютно черного тела (АЧТ) с яркостью, равной яркости источника излучения.

В литературе вместо радиояркой температуры объектов в радиометрии используется термин тепловое радиоизлучение. Основным законом теплового радиоизлучения является закон, связывающий спектральную плотность излучения АЧТ с температурой, который выражается формулой Планка. Для энергетических расчетов используется формула Релея – Джинса, которая получается как низкочастотный предел формулы Планка при усло-

вии $h\nu \ll kT$:

$$R_{\text{АЧТ}}(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT = \frac{2\pi kT}{\lambda^2} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \text{ Гц} \right],$$

где $R_{\text{АЧТ}}$ — энергетическая плотность излучения абсолютно черного тела; ν — частота, [Гц]; λ — длина волны, [м]; T — абсолютная температура, [°K]; k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [Дж/град].

Излучения реальных объектов часто значительно отличается от излучения АЧТ, поэтому для единообразия учета всех отличий формально заменяют излучение реального объекта излучением АЧТ, имеющим ту же интенсивность в заданном направлении при той же поляризации.

Объект излучения может находиться в поле излучения других излучателей и к его собственному излучению добавляется излучение “подсвечивающих” излучателей. В этом случае полное излучение определяется эквивалентной (кажущейся) температурой реального излучателя.

Для повышения радиояркостной температуры объекта, используют так называемую “подсветку” — источник излучения, который воздействует на объект исследования в оптическом или радиодиапазоне.

Целью данной работы является исследование источников шумовых колебаний, которые могут использоваться в качестве подсветки в миллиметровом (мм) диапазоне длин волн.

1 Методика измерений радиояркостного излучения

Многоканальная радиометрическая система содержит высокочувствительные широкополосные приемники прямого усиления с антеннами в 2, 3 и 8-мм диапазонах длин волн, которые используются для определения характеристик жидкостей. Устройства подсветки наиболее громоздки в 8-ми мм диапазоне длин волн, поэтому в дальнейшем приводятся результаты исследований только для этого диапазона.

В работе использован малощумящий широкополосный приемник прямого усиления с рупорной антенной в 8-ми мм диапазоне длин волн [6]. Приемник обеспечивал флуктуационную чувствительность $2,4 \cdot 10^{-20}$ Вт/Гц в рабочей полосе частот 30-37 ГГц и коэффициенте усиления линейной части приемника не менее 55дБ. В каждой точке пространства приемник определяет суммарный сигнал данного диапазона длин волн при фиксированной — вертикальной или горизонтальной поляризациях. Приемник установлен на 2D сканере, что позволяет измерять пространственное распределение поля исследуемого объекта. Шаг сканирования соответствует расстоянию 1.75 мм. Радиометрический приемник пошагово детектирует принятый шумовой сигнал. На

рис. 1 приведена схема установки для исследования устройств радиометрической подсветки.

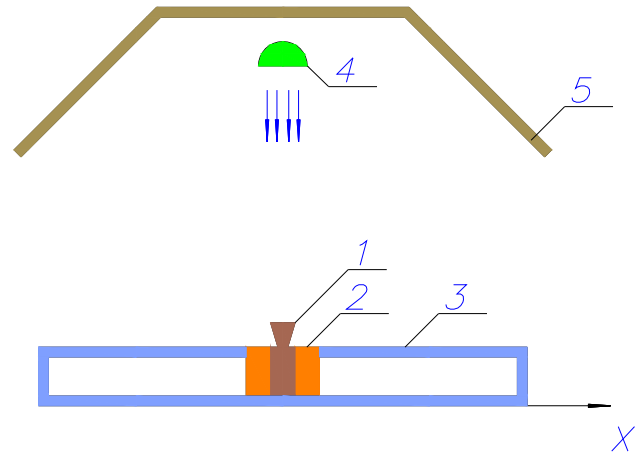


Рис. 1. Установка для исследования устройств радиометрической подсветки: 1 — приемник; 2 — платформа; 3 — горизонтальная направляющая; 4 — устройство подсветки; 5 — поглощающий материал.

Радиометрические измерения проводятся в экранированном боксе, стенки которого покрыты поглощающим материалом. Перед началом измерений приемник 1 калибруют по тепловому фону — радиояркостной температуре поглощающего материала 5. В процессе измерений определялась величина изменения уровня протектированного сигнала (ΔU , mV) относительно калибровочного уровня. При экспериментах расстояние между панелью с поглощающим материалом и антенной приемника равно $L = 300$ мм. Измерения проводились при температуре окружающей среды 15...27 °C. Для учета различных дестабилизирующих факторов калибровки осуществлялись в начале, конце и в течение измерений.

2 Генераторы шума в качестве радиометрической подсветки

Необходимость проведения исследований в помещении, где нет источников обеспечивающих радиояркостный контраст объектов, требует модификации радиометрической системы из пассивной в активную, то есть имеющую источники шумовой подсветки.

Наиболее простым и традиционным способом подсветки является использование генератора шума (ГШ) заданного диапазона длин волн.

Генераторы шума, которые использовались в работе, генерируют шумовой сигнал за счет шума лавины активного элемента [7]. В качестве активного элемента использованы лавинно — пролетные (ИМРАТТ) диоды. Основными параметрами ГШ являются: уровень спектральной плотности мощности шума (СПМШ) составляющий 25...27 дБ/кТ₀, рабочая полоса частот 27...38 ГГц, неравномерность шумовой характе-

ристики в рабочей полосе частот ± 1.5 дБ. На рис. 2 а показан ГШ, использованный в качестве задающего генератора шумовой панели.

С целью формирования плоского фронта электромагнитной волны внешнего подсвечивания, ГШ встраивают в панель. Панель представляет собой металлический параллелепипед, одна из стенок которого имеет отверстия, через которые происходит излучение шумового сигнала [8]. На рис. 2 б показана шумовая панель для рабочего диапазона 27...38 ГГц. Генератор шума на лавинно — пролетном диоде со стабилизатором тока через волноводный переход включен со стороны узкой стенки параллелепипеда в панель. Уровень интенсивности излучаемого шумового сигнала панели, при СПМШ генератора 25...27 дБ/кТ₀, составляет величину порядка $2 \cdot 10^{-10}$ Вт/см². Вертикальная поляризация излучения шумовой панели подсветки направлена перпендикулярно широкой стенке панели, а горизонтальная поляризация — вдоль широкой стенки панели (сверху — вниз).

На рис. 3 представлена зависимость уровня интенсивности излучения шумового сигнала при различных поляризациях принимаемого сигнала и расстояниях от панели. В экспериментах ось рупорной антенны приемника располагалась посередине узкой стенки шумовой панели (оси макета). Измерения интенсивности излучения шумового сигнала проводились вдоль длинной стенки шумовой панели. На графиках рис. 3 наблюдаются пики интенсивности для вертикальной поляризации принятого сигнала.

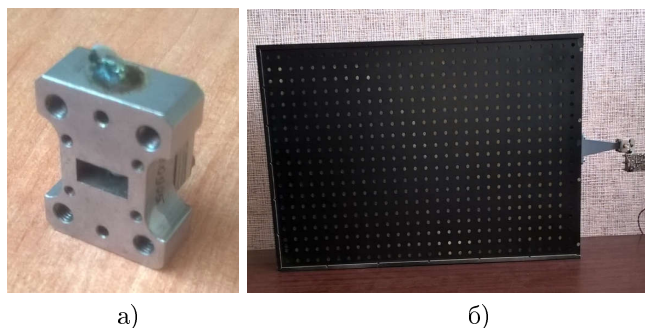


Рис. 2. Твердотельный источник подсветки: а) внешний вид ГШ; б) шумовая панель частотного диапазона 27...38 ГГц.

Расстояние между пиками на графиках равно 19.8 мм соответствует расстоянию между центрами отверстий на шумовой панели. При увеличении расстояния от шумовой панели до точки наблюдения, величина пиков интенсивности шумового сигнала для вертикальной поляризации уменьшается. В этом случае волновой фронт излучаемой электромагнитной волны сглаживается — становясь более плоским рис. 3б.

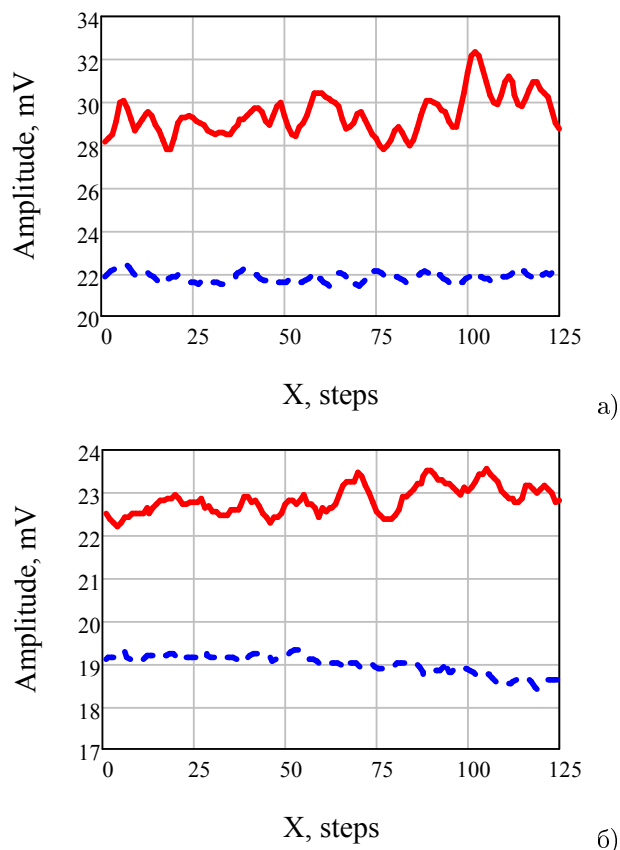


Рис. 3. Зависимость уровня интенсивности шумового сигнала от расстояния до шумовой панели: а) $L = 245$ мм; б) $L = 735$ мм. На графиках вертикальная поляризация (красные кривые), горизонтальная поляризация (синие кривые) принимаемого сигнала. По вертикальной оси указана амплитуда сигнала в точке приема (mV), по горизонтальной оси — шаги сканера относительно оси макета.

3 Люминесцентные лампы в качестве радиометрической подсветки

Для определения параметров и свойств объектов радиометрическими методами ближней радиолокации может оказаться достаточным использование в качестве подсветки шумовые сигналы от различных ламп.

Для получения видимого излучения необходимо, чтобы температура излучающего тела превышала 570 °С (температура начала красного свечения). Рабочие температуры нитей ламп накаливания лежат в пределах $2000 \dots 2800$ °С. Спектр ламп накаливания смещён в красную область спектра. Основная часть излучения ламп приходится на инфракрасную область электромагнитного спектра, и только малая доля излучения лежит в области видимого света.

Спектр излучения ламп накаливания является сплошным [9].

Лампа накаливания в соответствии с формулой Планка имеет очень малый уровень плотности излучения в мм диапазоне длин волн и большие изменения уровня даже в пределах одного частотного диапазона. На рис. 4 представлен уровень излучаемой энергии лампой накаливания мощностью 60 Вт в зависимости от изменения расстояния относительно оси макета. По вертикальной оси отложена величина изменения уровня протектированного сигнала ΔU (mV), по горизонтальной оси отложено расстояние (шаги сканера) относительно оси макета.

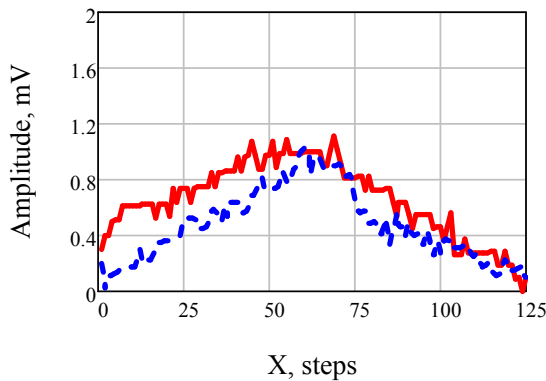


Рис. 4. Зависимость уровня протектированного сигнала в 8-ми мм диапазоне длин волн для вертикальной (синяя кривая) и горизонтальной (красная кривая) поляризаций от изменения расстояния относительно оси макета (положения радиометрического приемника) для лампы накаливания мощностью $P = 60$ Вт.

В газоразрядных лампах при прохождении тока через газ, в результате ионизации, образуется плазма, скорость электронов которой достигает больших значений за счет их ускорения приложенным электрическим полем. Средняя энергия движения электронов определяет электронную температуру плазмы. Электронная температура плазмы значительно выше, чем температура самого газа. Эта электронная температура соответствует шумовой температуре и характеризует величину шума. Так как температура плазмы велика — газоразрядные лампы имеют высокий уровень шумов. Разряд в газе низкого давления генерирует ультрафиолетовое световое излучение, которое взаимодействуя с люминофорами, вызывает люминесценцию в видимой части оптического диапазона. Эти процессы не связаны с тепловым излучением и на работу газоразрядной лампы в качестве подсветки в миллиметровом диапазоне длин волн не влияют.

Внешний вид и амплитуда протектированного шумового сигнала в 8-ми мм диапазоне длин волн для обычной газоразрядной лампы типа TL-D производства Philips представлены на рис. 5.

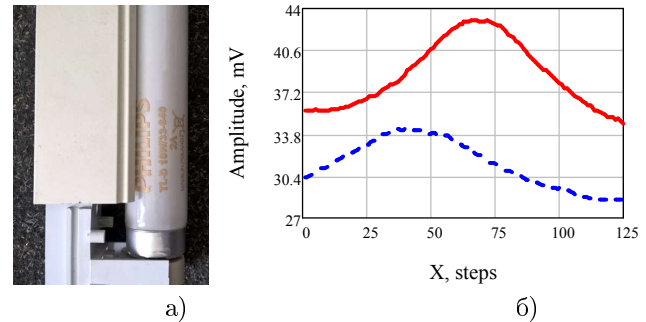


Рис. 5. Газоразрядная лампа типа TL-D: а) фото; б) зависимость уровня протектированного сигнала в 8-ми мм диапазоне длин волн при изменении расстояния от оси макета для вертикальной (синяя кривая) и горизонтальной (красная кривая) поляризаций.

Люминесцентные энергосберегающие лампы оборудованы системой плавного запуска, позволяющего лампе загораться постепенно в течение 1-2 секунд. Зажигание газового разряда определяется двумя факторами: доведения температуры электродов до величины, обеспечивающей термоэлектронную эмиссию электронов, и подачей на лампу необходимого по величине и продолжительности действия напряжения, создающего условия для начала ионизации газа в лампе.

Благодаря применению электронного балласта энергосберегающие лампы имеют улучшенные характеристики по сравнению с традиционными люминесцентными лампами с электромагнитным балластом. По уровню светимости люминесцентная энергосберегающая лампа в 5 раз ярче ламп накаливания той же мощности. Это позволяет экономить до 80% электроэнергии, энергосберегающие лампы выделяют меньше тепла, чем лампы накаливания.

На рис. 6а приведена фотография типичной настольной энергосберегающей люминесцентной лампы типа PL-SP 11 W/840 (G23/2P) и уровень генерируемой ею энергии в 8-ми мм диапазоне для различных поляризаций рис. 6 г, д, е. На всех графиках вертикальная поляризация обозначена синими кривыми, горизонтальная поляризация — красными кривыми. При проведении экспериментов баллоны энергосберегающей лампы располагались вертикально. Поляризация излучения принципиально зависит от наличия отражателя. Наличие металлического отражателя рис. 6б, изменяет плоскость поляризации генерируемого лампой излучения. В качестве отражателя для мм диапазона длин волн в экспериментах использована пластиковая арматура стандартного отражателя рис. 6в.

Смещение максимумов принятого излучения для вертикальной и горизонтальной поляризаций связано с изменением положения оси рупора радиометрического приемника относительно оси сканера при

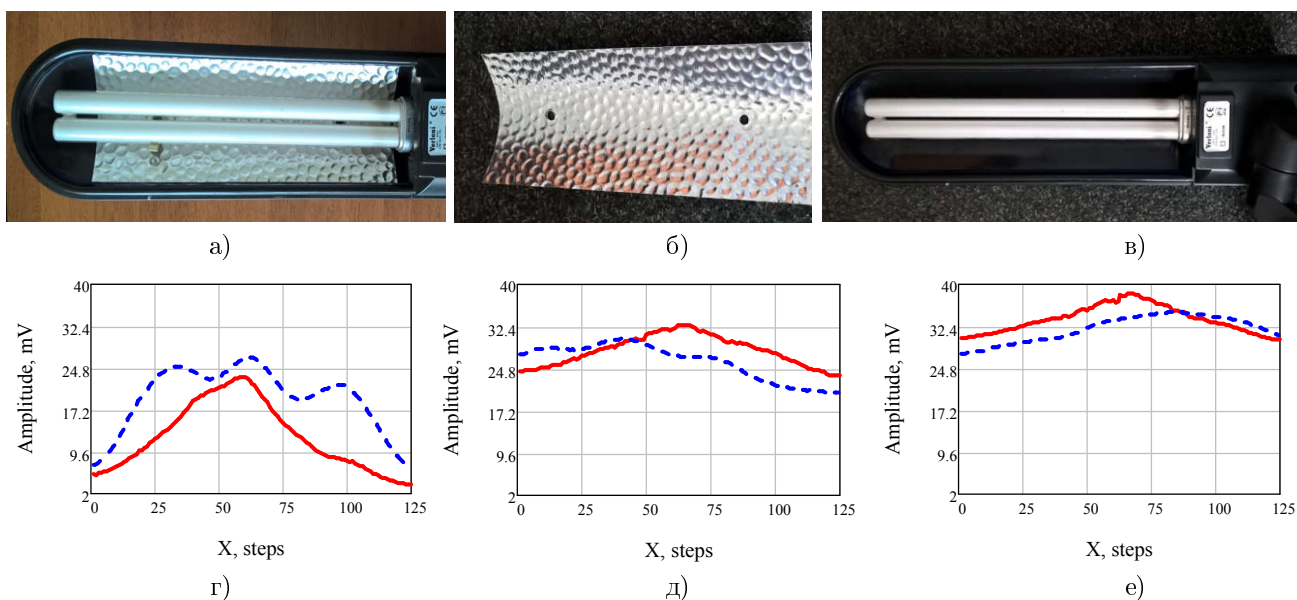


Рис. 6. Фото энергосберегающей лампы и зависимость изменения уровня протектированного сигнала в 8-ми мм диапазоне длин волн: а) лампа типа PL-SP 11 W/840 (G23/2P) в стандартной арматуре фирмы Verloni (лампа в сборе); б) металлический рефлектор энергосберегающей лампы; в) энергосберегающая лампа с пластиковым рефлектором; г) излучение лампы в сборе; д) излучения лампы с пластиковым рефлектором; е) излучения лампы без рефлектора.

проведении экспериментов. Поляризационные измерения проводились при изменении положения оси рупора приемника — приемник поворачивался на 90 градусов. Этим объясняется смещение максимумов для вертикальной и горизонтальной поляризаций на всех приведенных графиках. Приведенные результаты показывают изменение поляризации излучения при использовании рефлектора и слабое изменение уровня интенсивности излучения. Рефлектор концентрирует излучаемую энергию в плоскости излучения. Наличие трех максимумов на графике для вертикальной поляризации излучения рис. 6г связаны с возникновением интерференции излучаемой энергии.

Главными преимуществами использования люминесцентных энергосберегающих ламп в качестве радиометрической подсветки является то, что они имеют встроенный блокинг-генератор (частота переключений 200...1000 Гц). Он позволяет просто согласовать внешнюю подсветку и схему измерительного модуляционного радиометра (приемника). Встроенные в арматуру лампы рефлекторы позволяют легко регулировать поляризацию излучения.

Аналогичные исследования проводились с газоразрядными энергосберегающими лампами других типов. Стандартные энергосберегающие лампы типа «Искра» содержат три, расположенных по кругу U-образных трубок — колбы рис. 7а. Экспериментально показано, что излучение при вертикальной установке лампы типа «Искра» по уровню мощности и поляризации практически не отличаются от лампы с одной U-образной трубкой рис. 7б.

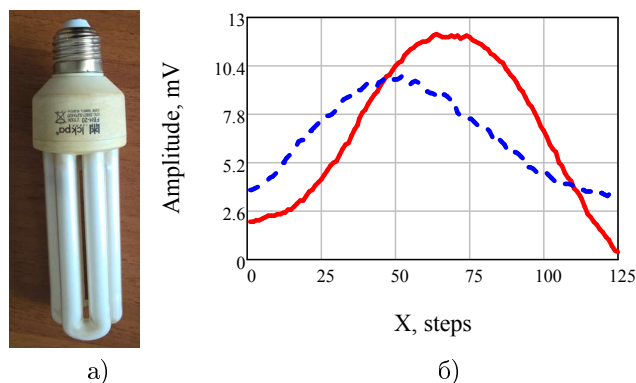


Рис. 7. Стандартная энергосберегающая лампа типа FВН-20 производства «Искра»: а) фото; б) зависимость изменения уровня протектированного сигнала в 8-ми мм диапазоне длин волн для вертикальной (синяя кривая) и горизонтальной (красная кривая) поляризаций.

Экспериментально показано, что излучение от ультрафиолетовой лампы типа «DeLux» EBT-01 26W E27 УФ в мм диапазонах имеет очень низкий уровень интенсивности.

Энергосберегающая лампа типа «Maxus», имеют спиральные трубки-колбы. Эта лампа отличается большей величиной излучаемой энергии при горизонтальной поляризации. Внешний вид и уровень излучаемой энергии для лампы «Maxus» при ее вертикальном расположении приведены рис. 8.

Экспериментальные данные уровней излучаемой мощности, генерируемой различными источниками, пронормированы относительно энергосберегающей

лампы типа PL — SP 11 W/840 (G23/2P) в стандартной арматуре фирмы «Verloni». Результаты исследований наиболее типичных источников подсветки представлены на рис. 9.

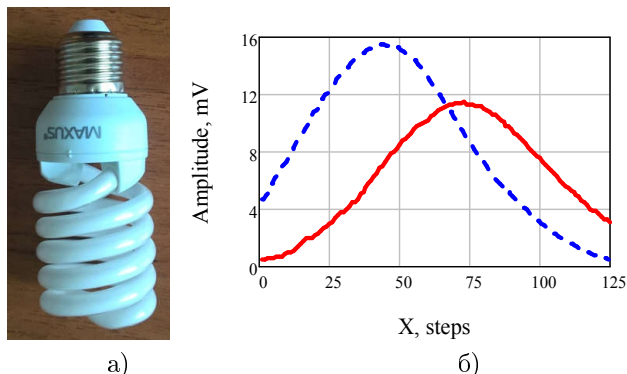


Рис. 8. Стандартная энергосберегающая лампа «Махус»: а) фото; б) зависимость изменения уровня протектированного сигнала в 8-ми мм диапазоне длин волн для вертикальной (синяя кривая) и горизонтальной (красная кривая) поляризаций.

Выводы

Применение методов и аппаратуры многоканальной ближней локации требует использования устройств подсветки для увеличения радиояркости контрастности объекта исследования. В качестве источника излучения кроме традиционных генераторов шума, могут быть использованы газоразрядные лампы, которые для обычной локации не применяются. При использовании газоразрядных ламп необходимо обращать внимание не только на уровень шумовой мощности, но и на особенности поляризации излучения, которые зависят от конструкции лампы.

В миллиметровом диапазоне длин волн, газоразрядные лампы имеют достаточный и стабильный уровень СПМШ, несмотря на то, что в оптическом диапазоне излучение газоразрядных ламп имеет узкие пики. Диоды LED имеют значительную яркость в оптическом диапазоне, но в миллиметровом диапазоне длин волн не имеют шумового излучения.

Низкочастотная модуляция у энергосберегающих ламп позволяет их использовать при построении модуляционных радиометрических систем миллиметрового диапазона для дистанционного детектирования параметров жидкостей.

Излучаемая плотность потока мощности шумовой панели ниже, чем у стандартных газоразрядных энергосберегающих ламп, но его неравномерность по площади минимальна. Фронт излучаемой электромагнитной волны для шумовой панели становится практически плоским на расстоянии порядка 300...400 мм. Для многочастотной подсветки целесообразно

использование нескольких шумовых панелей или модификации существующей.

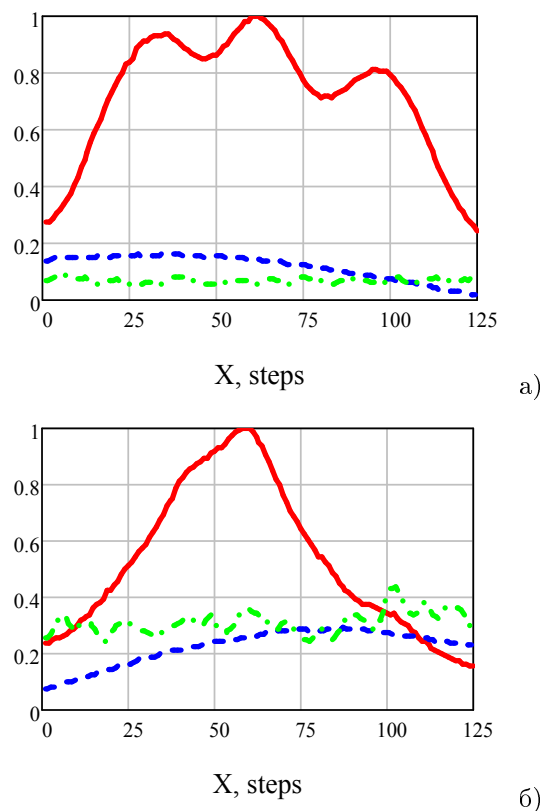


Рис. 9. Зависимость изменения уровня протектированного сигнала в 8-ми мм диапазоне длин волн для исследованных источников подсветки относительно оси макета: а) вертикальная поляризация излучаемой энергии; б) горизонтальная поляризация излучаемой энергии. Красные кривые — энергосберегающая лампа, зеленые кривые — шумовая панель, синие кривые — лампа накаливания.

Благодарность

The NATO Science for Peace and Security Programme. Project G5005

References

- [1] Beckmann J., von Chrzanowski L. S., Fratzscher D. and Ewert U. (2012) Spectral and spatial nondestructive examination of dielectric materials with THz time domain spectroscopy. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1430, Iss. 1. DOI: 10.1063/1.4716279.
- [2] Mextorf H., Daschner F., Kent M. and Knechel R. (2013) ISOPerm: Non-Contacting Measurement of Dielectric Properties of Irregular Shaped Objects. *Ultra-Wideband Radio Technologies for Communications, Localization and Sensor Applications*. DOI: 10.5772/55079.
- [3] Helmy A.A. and Entesari K.A. (2012) 1–8-GHz Miniaturized Spectroscopy System for Permittivity Detection and Mixture

- Characterization of Organic Chemicals. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 60, Iss. 12, pp. 4157-4170. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2224363
- [4] Divin Y., Lyattia M., Poppe U. and Urban K. (2012) Identification of Liquids by High-Tc Josephson THz Detectors, *Physics Procedia*, Vol. 36, pp. 29-34. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.125.
- [5] Loshytskyi P. P. and Mynzyak D. Yu. (2011) Investigation of concentration dependence of water solutions. *Medychna informatyka ta inzheneriia*, No 2, pp. 29-34. (in Ukrainian)
- [6] Vertiy A., Ozbek S., Pavlyuchenko A., Panin S., Tekbas M., Kizilhan A., Cetinkaya H. and Unal A. (2011) Passive radiometric imaging systems in millimeter wavelength range. *Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on*. DOI: 10.1109/APS.2011.5996927
- [7] Pavlyuchenko A. V. (2013) The source of radiometric noise illumination. *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2013 23rd International Crimean Conference*.
- [8] Appleby R., Wikner D. A., Trebits R. and Kurtz J. L. (2003) Development of an illumination chamber for indoor millimeter-wave imaging. *Proc. SPIE 5077, Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VI and Radar Sensor Technology VII*, 54. DOI: 10.1117/12.487031
- [9] Landsberg G. S. (2009) *Optika, 6-e izd.* [Optics, 6th ed.], Moscow, Fizmatlit Publ., 848 p.

Радіометрична підсвітка ближньої радіолокації

Павлюченко А. В., Лошицький П. П.,
Шеленгівський А. І., Бабенко В. В.

Представлені дослідження різноманітних джерел шумового випромінювання у надвисокочастотному діапазоні довжин хвиль з метою збільшення радіояскравісного контраста об'єктів та їх використання у якості підсвітки у багатоканальній радіометричній системі. Низькочастотна модуляція енергозберігаючих ламп дозволяє їх використовувати при побудові модуляційних радіометричних систем

мм діапазонів довжин хвиль для дистанційного детектування об'єктів. Щільність потоку потужності шумової панелі нижче ніж енергозберігаючих ламп, але фронт випроміненої електромагнітної хвилі стає майже плоским на відстані від неї 300-400мм.

Ключові слова: ближня радіолокація; радіометрія; генератори шуму; підсвітка

Radiometric illumination for short-range radar

Pavlyuchenko, A. V., Loshitskyi, P. P., Shelenhivskiy, A. I., Babenko, V. V.

The usage of methods and devices of close multichannel location requires usage of illumination devices to increase radio brightness of the research's object. As a source of radiation apart of traditional noise oscillators, gas-charge tubes can be used, which are not used for regular location. During usage of the gas-charge tubes, the noise power level should be taken into consideration as well as the radiation's polarization particular qualities, which are dependent on tube's construction. The gas-charge tubes have sufficient and stable level of СПМШ in millimeter wave length despite the fact that gas-charge radiation in optical range has narrow peaks. LED diodes have considerable brightness in optical range, however, they do not possess noise radiation in millimeter wave length. The research of different sources of noise radiation in MW frequency range with aim of increase in radio brightness contrast of objects and its usage as an illumination in multichannel radiometric systems is represented. Low-noise modulation of energy-efficient lamps allows to use them in designing of the modular radiometric systems in MW frequency range for remote detection of objects. Power flux density of the noise pannel is lower than the one which is produced by energy-efficient lamps, yet radiation front of electromagnetic wave is almost flat at the distance of 300-400 mm from the panel.

Key words: short-range radar; radiometry; noise oscillator; illumination