

## **Плазменная антенна с парами ртути вида полувибратора Пистолькорса на металлическом экране**

В.А. Егоров, С.А. Егоров, В.И. Луценко

*Институт Радиофизики и Электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, ул. Проскуры, 12. Харьков, 61085, Украина, e-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua*

*Исследованы излучательные характеристики плазменной антенны (ПА) выполненной на лампе с холодной плазмой и с парами ртути в виде полувибратора Пистолькорса на металлическом экране в зависимости от ее светимости. Проведено сравнение характеристик ПА с вибратором, выполненным из металла. Делается вывод о том, что такие антенны имеют меньшую излучательную способность, чем металлические, однако более широкополосны. Изменение светимости (концентрации плазмы за счет изменения питающего напряжения) позволяет в широких пределах (более 10дБ) изменять уровень излучаемого сигнала.*

*The radiation characteristics of a plasma antenna (PA) made on a lamp with a cold plasma and with mercury vapor in the form of a Pistolcors semi-vibrator on a metal screen depending on its luminosity are investigated. A comparison of the characteristics of the PA with a vibrator made of metal. It is concluded that such antennas have a lower emissivity than metal ones, but are more broadband. A change in the luminosity (plasma concentration due to a change in the supply voltage) allows changing the level of the emitted signal over a wide range (more than 10 dB).*

### **Введение**

Плазменные антенны и их использование в различных областях техники, в том числе и военных, является сейчас весьма актуальной задачей. В последнее время появление гиперзвуковых летательных аппаратов, движущихся в плотных слоях атмосферы и окруженных плазменным слоем, который делает невозможным осуществление с ними связи и управления, а также широкое применение в космонавтике специализированных плазменных двигателей существенно подогрели интерес к этой проблеме.

Известен ряд публикаций по результатам разработки и исследований плазменных антенн (ПА), выполненных на основе холодной плазмы газового разряда [1-4], в работе [1] приведены результаты теоретической оценки и основные разновидности ПА, а в статье [2] приведены результаты исследования внутренних и внешних характеристик петлевой ПА СВЧ-диапазона. Предложен метод определения проводимости плазмы. Показано, что коэффициент усиления ПА можно изменять более чем в 2 раза путем регулирования значения постоянного тока в цепи газового разряда. В работе [3] рассмотрены разновидности современных ПА, разрабатываемых в США в интересах Вооруженных сил, а в публикации [4] приведены результаты расчетов и экспериментальной проверки параметров петлевых ПА.

В ряде случаев интерес к ПА объясняется их свойствами при необходимости исчезать из поля зрения радиолокационных и других средств. Также на основе ПА можно создавать сложные и многофункциональные реконфигурируемые антенны. К сожалению, будучи в определенной степени полупроводящей средой [5], ПА обладают по сравнению с металлическими антеннами несколько пониженной эффективностью излучения или КПД. Иногда, как следует из [1], иногда внутрь ПА вместе с нейтральным газом вводится некоторое количество ртути, что влияет на радиотехнические (РТ) параметры ПА и затрудняет их теоретическую оценку.

В работе [6] исследована задача о влиянии паров ртути в ПА на их РТ-характеристики. Приведены результаты учета влияния паров ртути на удельную

проводимость (УП) и относительную диэлектрическую проницаемость (ДП) внутренней среды различных плазменных антенн в двух характерных частотных диапазонах. Представлены результаты расчетов коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), КПД, диаграмм направленности (ДН) ПА в двух диапазонах с учетом и без учета влияния паров ртути.

Наиболее полно обзор состояния дел с разработкой и использованием плазменных антенн дан в работе [7]. Там же дана и библиография по данному вопросу

В настоящей работе исследуются излучательные характеристики плазменной антенны в виде газоразрядной трубки с парами ртути, представляющей петлевой полувибратора Пистолькорса на металлическом экране.

### Аппаратура и методика эксперимента

В качестве плазменной антенны в экспериментах использовалась U-образная газоразрядная трубка лампы дневного света. Она питается от преобразователя напряжения с частотой примерно 25-30 кГц. Изменением питающего его напряжения при помощи латра осуществлялось изменения режимов ее работы. Контролировались напряжение и ток питающей преобразователь сети 50Гц. Антенна через согласующее устройство запитывалась от ВЧ генератора Г4-129 в полосе частот 300 600 МГц.

Для приема излучаемого ПА сигнала использовался SDR приемник, работающий в диапазоне 50МГц...2,5ГГц. Упрощенная схема экспериментальной установки показана на рис.1, а общий вид передающей и приемной частей комплекса на рис.2, 3.

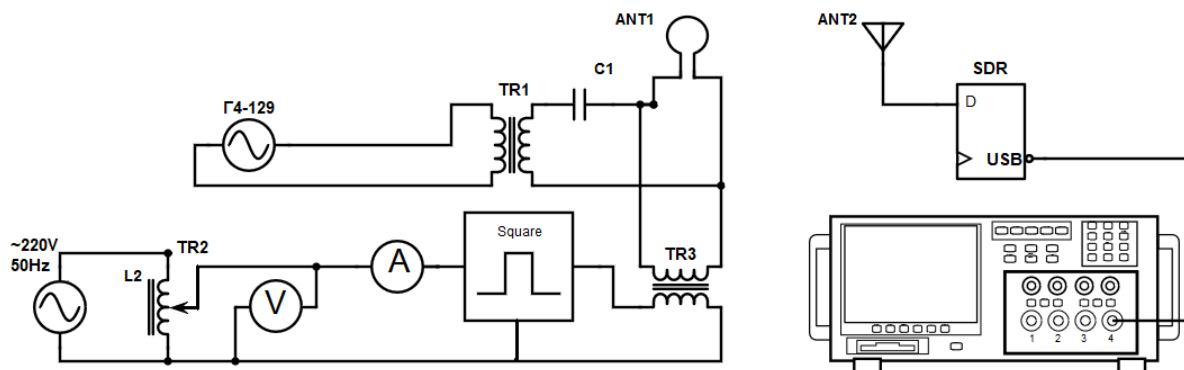


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема установки.



Рис. 2. Общий вид передающей части комплекса.

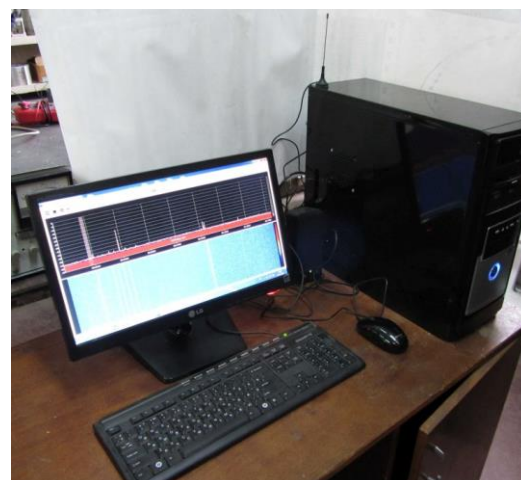


Рис. 3. Общий вид приемной части комплекса.

Принятый приемником сигнал от ПА может быть записан:

$$P_{Pl}(f) = \frac{P_G(f)G_{Pl}(f)G_R(f)}{4\pi R^2} \quad (1)$$

$P_{Pl}(f)$  – принятый приемной антенной сигнал на частоте  $f$ ,

$P_G(f)$  – мощность сигнала на выходе генератора,

$G_{Pl}(f)$ ,  $G_R(f)$  – коэффициенты усиления передающей плазменной и приемной – дипольной антенн соответственно,

$R$  – расстояние между передающей и приемной антеннами.

Очевидно, что уровень принятого сигнала будет зависеть не только от частотных характеристик исследуемой ПА  $G_{Pl}(f)$ , но и от слабо контролируемых изменений мощности генератора  $P_G(f)$  и неизвестной частотной характеристики приемного диполя  $G_R(f)$ . Чтобы уменьшить влияние неконтролируемых параметров на результаты измерений можно использовать метод сравнения характеристик известной антенны, например полувибратора Пистолькорса и исследуемой плазменной антенной. Для этих целей был изготовлен полувибратор Пистолькорса с размерами такими же, как и U образная трубка лампы, используемая в виде ПА.

Тогда по аналогии с (1) можно записать выражение для принимаемого приемником сигнала  $P_V(f)$  от эталонной антенны  $G_V(f)$ :

$$P_V(f) = \frac{P_G(f)G_V(f)G_R(f)}{4\pi R^2} \quad (2)$$

Если взять отношение принимаемых сигналов от плазменной антенны и вибратора Пистолькорса, то оно будет зависеть только от частотных характеристик этих антенн, а поскольку характеристика вибратора Пистолькорса достаточно хорошо известна и может быть теоретически рассчитана. То это позволяет исследовать частотную характеристику ПА.

$$P_{Pl}(f)/P_V(f) = G_{pl}(f)/G_V(f) \quad (3)$$

При этом не будут сказываться неконтролируемые изменения уровней сигнала генератора в полосе частот, а также влияние частотной характеристики приемного диполя.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Предварительно была изучена зависимость уровня излучаемого заземленным полувибратором Пистолькорса сигнала от частоты – рис.4а. уровня шума в полосе измерений – рис.4б, и соотношения сигнал/шум-рис. 4в.. Видно. что уровень шума во всей полосе анализа составляет около -59дБ. Его флуктуации не превышают  $\pm 2$ дБ.

Поэтому изменения уровня излучаемого сигнала в полосе измеряемых частот имеют примерно такой же вид, как и соотношения сигнал/шум – рис.4а,в.

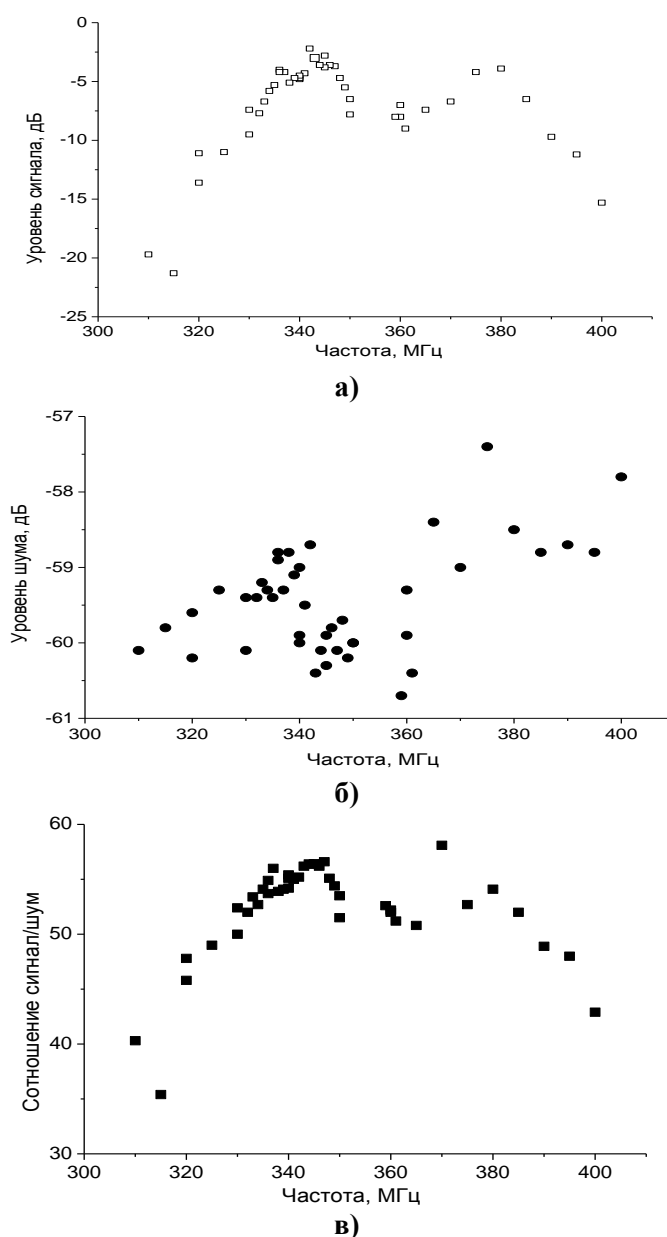
Получена зависимость излучаемого светового потока лампы от питающего ее напряжения. Она приведена на рис.5.

Видно, что светимость ПА меняется примерно линейно от прикладываемого к преобразователю напряжения. Поскольку при изменении питающего напряжения в широких пределах (60...220В) ток преобразователя практически не изменяется (примерно 44ма), то это означает, что светимость линейно пропорциональна мощности возбуждения лампы. И лишь при малых напряжениях, непосредственно перед тем, как погаснуть наблюдается резкое возрастание тока более чем до 70ма, что может быть связано не только с увеличением тока через лампу, но и возрастанием потребления питающего ее преобразователя при низких напряжениях. При напряжениях выше номинального наблюдается насыщение светимости. Поэтому для ее аппроксимации можно использовать квадратичную зависимость. А в диапазоне, не превышающем номинальные значения напряжения питания лампы (от 70В до 220В) для практических расчетов вполне можно пользоваться линейной зависимостью.

Возбуждается ПА преобразователем напряжения с частотой около 30кГц. Форма питающего ПА напряжения – меандр. Это приводит к тому, что при запитке ПА монохроматическим сигналом она излучает спектр, в котором кроме несущей присутствуют и частоты модуляции – рис.6

Видно, что на всех частотах излучается линейчатый спектр, в котором кроме несущей присутствует 2...3 пары боковых частот, разнесенных относительно нее на частоту питающего лампы преобразователя напряжения, а уровень на 25...35 дБ ниже несущей.. Соотношения между несущей и боковыми линиями сохраняются, однако в ряде случаев, например на частотах 399,94МГц и 459,946МГц наблюдается некоторая асимметрия спектра связанная, по видимому влиянием частотной характеристики ПА.

Заменив заземленный полувибратор Пистолькорса на ПА такой же формы были исследованы частотные характеристики излучения – рис.7а, а также ее излучательная способность – рис.7в относительно классического заземленного полувибратора Пистолькорса – рис.7б.



**Рис. 4.** Зависимость от частоты (а) уровня излучаемого заземленным полувибратором Пистолькорса сигнала, уровня шума(б) и соотношения сигнал /шум(в).

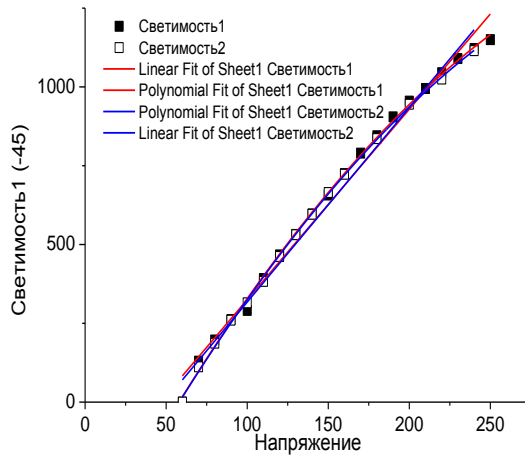


Рис. 5. Зависимость светимости от величины питающего лампы напряжения.

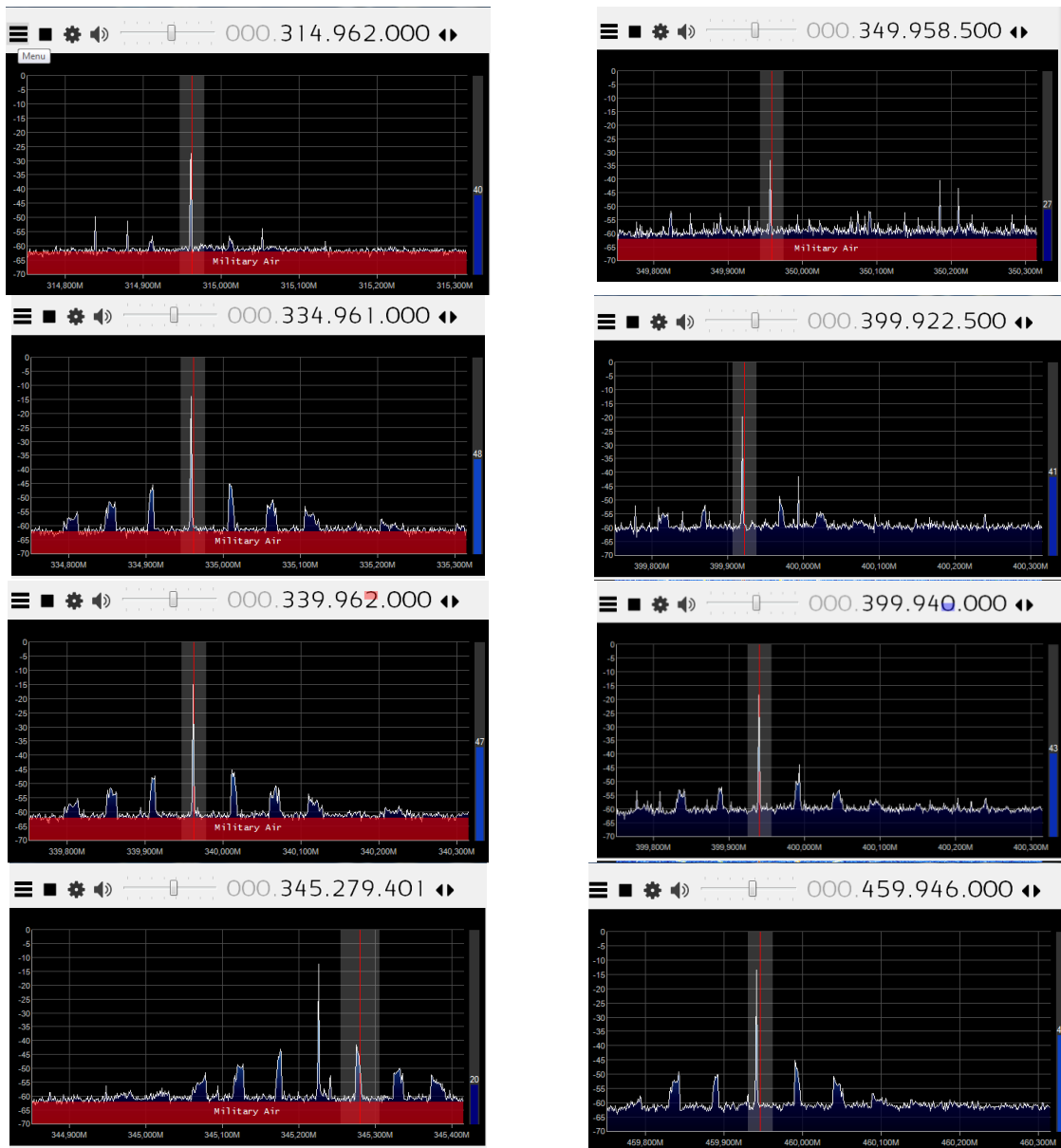
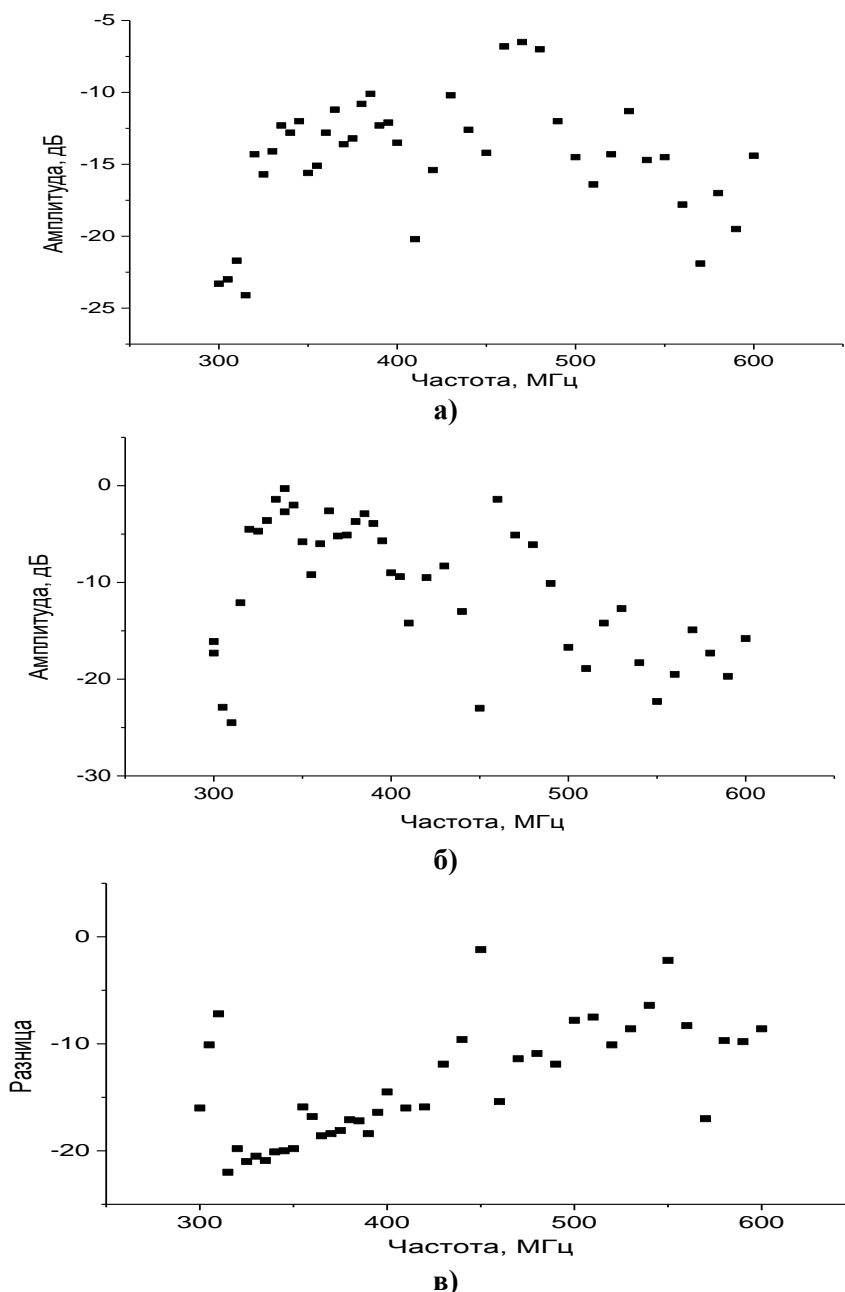


Рис. 6. Спектры излучения ПА при различных частотах запитки (указаны в верхнем поле рисунка в МГц).



**Рис. 7. Излучательная способность ПА (а), заземленного полувибратора Пистолькорса (б) и разница их излучательных способностей (в).**

Видно, что для ПА такой же формы, как и полувибратор Пистолькорса характерны примерно те же резонансные частоты, однако ее частотная характеристика излучения более широкополосна. Дифференциальная излучательная способность- рис.7в возрастает при увеличении частоты . однако в целом она ниже, чем у классического вибратора Пистолькорса примерно от -20дБ (на низких) до -10дБ ( на высоких) частотах. Иными словами относительная излучательная способность ПА с парами ртути возрастает более чем на 10 дБ по сравнению с вибратором Пистолькорса при изменении частоты от 300МГц до 600МГц. Более низкая, чем у металлического классического вибратора излучательная способность ПА, заполненной ртутными парами связана с большими потерями в плазме с парами ртути. Это же обстоятельство является причиной большей широкополосности таких антенн по сравнению с металлическими.

Исследовалась излучательная способность ПА от светимости при изменении питающего напряжения – рис. 8 для двух частот в области основного резонанса: 340МГц и 345МГц.

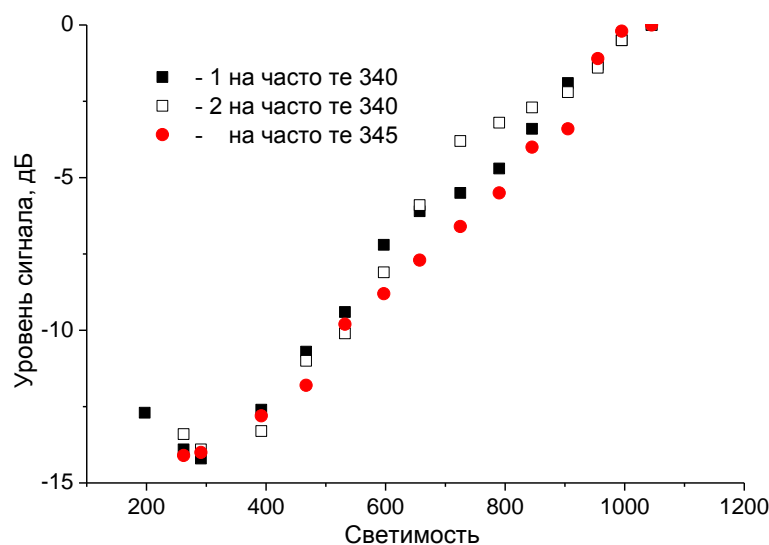


Рис. 8. Зависимость уровня излучаемого сигнала от светимости ПА на разных частотах.

Видно, что в достаточно широком диапазоне – более 10дБ сохраняется линейная зависимость уровня сигнала  $S$  в логарифмическом масштабе от светимости лампы  $\Delta E$ :

$$\lg(S) = \alpha(E - E_0) \quad (4)$$

где  $E$  – уровень освещенности, измеренный возле лампы (в нашем случае на удалении около 13см от нее),

$E_0$  - уровень внешнего фона,  $\alpha$  –const

Тогда выражение (4) в линейном масштабе будет иметь вид:

$$S = \exp(\alpha(E - E_0)), \quad (5)$$

Т.е. зависимость амплитуды излучаемого ПА сигнала экспоненциально зависит от светимости ПА.

### Заключение

1. Плазменная антенна с плазмой в виде паров ртути имеет излучательную способность на 10...20 дБ ниже, чем аналогична металлическая антенна, однако она более широкополосна.

2. Относительная излучательная способность ПА по сравнению с обычной металлической антенной возрастает при увеличении частоты с 300 МГц до 600 МГц примерно на 10дБ

3. Изменяя напряжение возбуждения (светимости) можно в широких пределах (более 10дБ) изменять уровень излучаемого ПА сигнала. Это может использоваться для осуществления амплитудной модуляции излучаемого ПА сигнала.

### Литература

1. Jenn D. C. Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art / D. C. Jenn; Naval Postgraduate School, Prepared for SPAWAR PMW 189. - San Diego, 2003. - 27p.
2. Овсяников В. В. Широкополосный СВЧ-излучатель на основе плазмы газового разряда / В. В. Овсяников // Радиофизика и радиоастрономия. - 2001. - 6, № 3. - С. 261-267.
3. Alexeff I. Plasma Antennas [Электронный ресурс] / I. Alexeff, T. Anderson // XI

- Kharkiv Young Scientists Conf. on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. - Kharkiv, 2011. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с этикетки диска.
4. Research Antenna Made of Gas Plasma on Microwave Band / A. Y. Bezpалov, V. V. Gnatushenko, V. V. Ovsyanikov et al. // 4<sup>th</sup> Europ. Conf. on Antennas and Prop. (EuCAP'2010): proc. - Barcelona, 2010. - 4 p.
5. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. - М.: Физматгиз, 1960. - 552 с.
6. В. В. Овсяников, С. Н. Мороз Взаимодействие электромагнитных сигналов с антенной, выполненной из плазмы газового разряда / 821X Радиофизика и электроника. 2013. Т. 4(18). № 2. –С.51-55.
7. А.А.Рухадзе, Н.Н.Богачев, К.Ф. Сергейчев, Д.М. Карфидов, И.М.Минаев, О.В. Тихонович Плазменные антенны (теория и эксперимент) / ИОФ РАН: Теоретический отдел, Отдел физики плазмы, Электронный ресурс [www.gpi.ru/konkurs\\_gpi/static/main\\_competition/2014\\_Rukhadze.pdf](http://www.gpi.ru/konkurs_gpi/static/main_competition/2014_Rukhadze.pdf)