



ВРЕМЯ ТРАНЗИТНОГО ЗАХВАТА ПРИ НЕАСТАТИЧЕСКОЙ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКЕ ЧАСТОТЫ

Арсланов А.А.

Московский энергетический институт, Москва, Россия

E-mail: arslanov.arsen@gmail.com

Поисковые системы слежения за различными параметрами сигналов широко используются для решения различных задач современной радиотехники. В основе этих поисковых систем лежит система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В данной работе численно рассчитано время транзитного захвата в бесфильтровой системе ФАПЧ. Ее структурная представлена на рис.1.

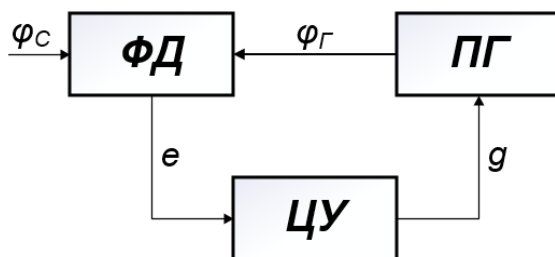


Рис.1. Структурная схема простейшей ФАПЧ

Математической моделью неастиатической системы ФАПЧ является дифференциальное уравнение вида:

$$p\varphi + \Omega_y \cos \varphi = \Omega_n + at,$$

где $\varphi = \varphi_g - \varphi_c$ — разность фаз ПГ и сигнала; $\cos \varphi$ — характеристика ФД; Ω_y — полосу удержания; Ω_n — начальная разность частот подстраиваемого и эталонного генераторов; a — скорость поиска.

Данная модель является автономной, поэтому ее нельзя проинтегрировать напрямую аналитически, поэтому, для ее изучения нужно использовать численные или приближенные методы.

На рис. 2 показана типичная осциллограмма процесса $\dot{\varphi}(t)$. Характерной особенностью этой осциллограммы является наличие участка замедленного изменения $\dot{\varphi}(t)$ длительностью Δt_{TP} (времени транзитного захвата).

В ходе расчетов было установлено, что аппроксимация вида $t_{TP} = \frac{2}{F}$, где $F = \frac{a}{\Omega_y^2}$,

хорошо заменяет зависимости, полученные численно, и может быть использована для нахождения времени транзитного захвата при неастиатической ФАПЧ.

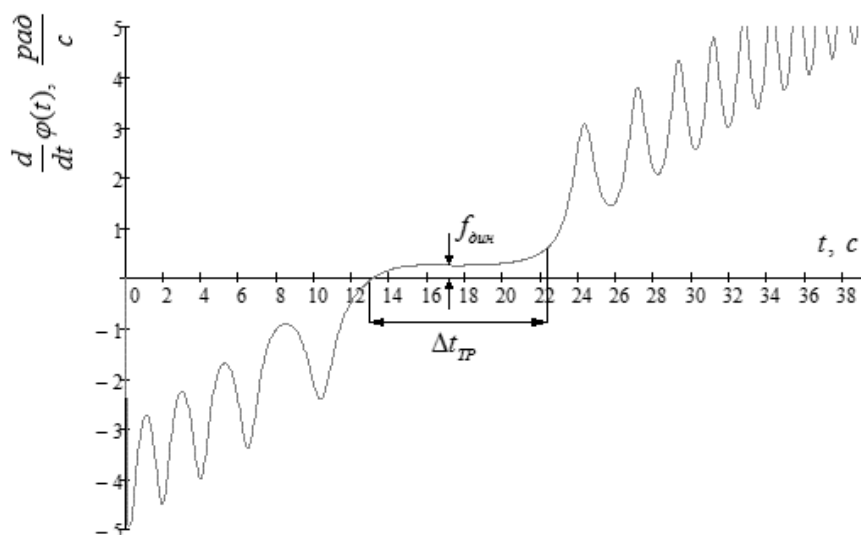


Рис. 2. Осциллограмма процесса $\dot{\varphi}(t)$.

Литература

1. Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М., «Связь», 1972.
2. Акимов В.Н. и др. Системы фазовой синхронизации. Под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной. М.: Радио и связь, 1982.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ КОЛЛЕКТОРОВ ЭГД-ЯЧЕЙКИ

Бабушкин М.Д.

*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург,
Россия*

E-mail: babushkin.m.d@gmail.com

В последнее время во всем мире проявляют все больший интерес в разработке методов электродинамического (ЭГД) управления газовыми потоками [1,5,6]. Ионотроны состоят из источника плазмы, области, в которой происходит дрейф заряженных частиц, (блока ускорения) и коллектора ионов или нейтрализатора [4]. Часто эти три части объединены в единую систему и формируют ЭГД-ячейку. Оптимизация ЭГД-ячейки может существенно повлиять на ее эффективность, вес и тягу [2,3,7,8]. В данной работе мы исследовали влияние эквивалентной площади поверхности электродов коллекторов (и их массы) на характеристики тяги системы, состоящей из пяти параллельных ячеек. При этом менялся периметр приемного электрода, а длина коллектора оставалась неизменной.

На рисунке 1 показана экспериментальная установка: (1) высоковольтный источник питания, (2) токоограничивающее сопротивление 100 кОм; (3) вольтметр; (4) ЭГД-ячейка; (5) электростатический экран; (6) весы; (7) микроамперметр. Геометрические параметры ЭГД-ячейки определялись следующими величинами: радиус проволочного эмиттера $r_w = 40 \pm 1$ мкм; радиус скругления коллектора $r_c = 0,8 \pm 0,1$ мм; высота между коллектором и эмиттером $h = 18 \pm 0,5$ мм; межэлектродное расстояние $l_1 = 10 \pm 0,1$ мм; длина коллекторов $l_2 = 135,3 \pm 0,1$ мм; количество коллекторов $n = 6$.

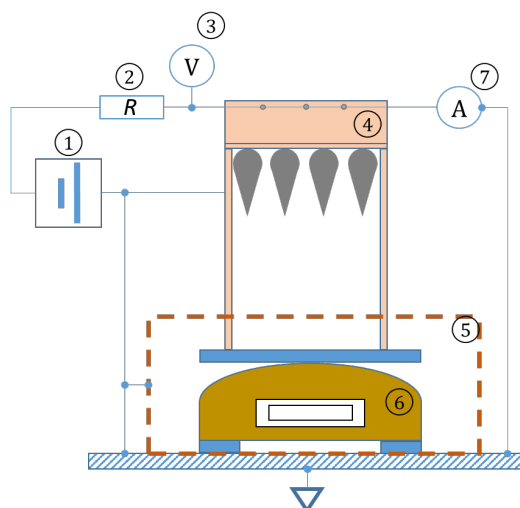


Рис. 1. Экспериментальная установка

Эксперименты показали, что для данной геометрии с малым зазором между электродами максимальная тяга достигается при положительной короне для любого значения площади эмиттера. На рисунке 2 видно, что уменьшение периметра коллектора не оказывает существенного влияния на тягу F .

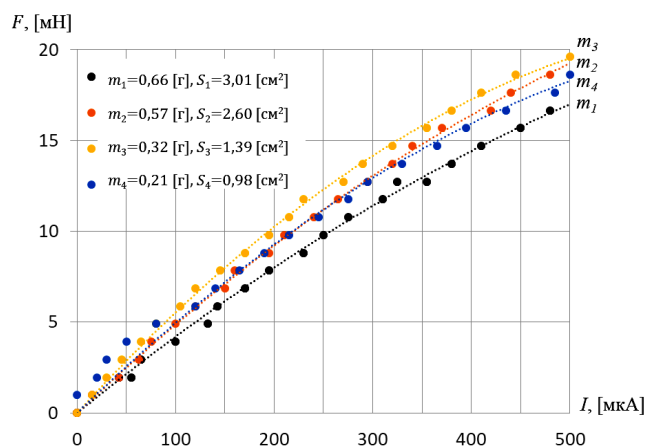
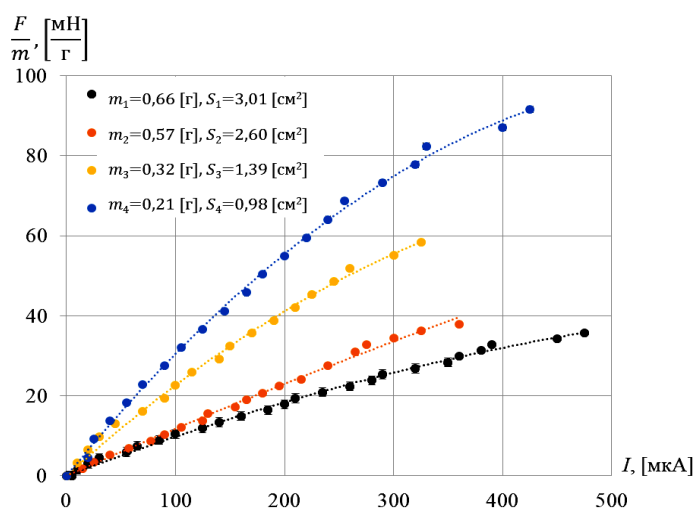
Рис. 2. Зависимость тяги F от силы тока I при различных массах коллекторов

Рис. 3. Тяга ЭГД-ячейки отнесенная к массе коллекторов от тока при различных периметрах коллекторов

Эксперименты показали, что для рассматриваемой геометрии с малым зазором между электродами максимальная тяга достигается при положительной короне для любого значения площади эмиттера. Из результатов, представленных на рисунке 3, видно,

что удельная тяга (отношение тяги к массе коллекторов) на единицу длины увеличивается с уменьшением их периметра и, соответственно, эффективной площади коллектора. При значении $I = 250$ мкА, развиваемая тяга превышает массу электродной системы более чем в 60 раз. Таким образом, использование коллекторов с меньшей площадью поверхности в рассмотренной системе (меньшим периметром) приводит к увеличению массы полезной нагрузки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 17-08-01409 А

Литература

1. Aleshin B.S. et.al. // Technical Physics Letters. 2017. Т. 43. № 1. С. 64–66.
2. Dremin D.V. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 927. P. 012015.
3. Dremin D.V. et al. // PLTP-2017. Kazan, Russian Federation, 2017. Vol. 1. P. 242.
4. Drew // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 114, № 14. P. 143302.
5. Gilmore C., Barrett R.H. // Nature. 2018. Vol. 563, P. 532–535.
6. Khomich V.Y., Rebrov I.E. // Journal of Electrostatics. 2018. Vol. 95. P. 1–12.
7. Moreau E., Benard N. // Journal of Physics D. 2013. Vol. 46, № 47. P. 475204.
8. Rebrov I.E. et.al. // Technical Physics. 2016. Т. 61. № 8. С. 1130–113

МЕТОДЫ МОДЕРНИЗАЦИИ КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ РУБИДИЯ - 87

¹Валов А.П., ²Петров А.А., ²Рудь В.Ю.

¹ГУ телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

²С-Пб политехнический университет Петра Великого

E-mail: tony.valov2015@yandex.ru

В данный момент к навигационным системам, установленным на подвижных объектах, предъявляются повышенные требования, которые связаны с необходимостью определения положения координат объекта с точностью менее 1.5 м для решения различных задач [1–5]. Использование в этих объектах качестве опорных генераторов квантовых стандартов частоты (КСЧ), временные шкалы которых синхронизованы с высокой точностью со спутниковыми шкалами времени является единственным возможным решением, которое позволяет выполнить эти требования [1, 4, 5].

Использование квантовых стандартов частоты на атомах рубидия - 87 является наиболее целесообразным решением, так как они обладают небольшими габаритами по сравнению с другими моделями КСЧ и просты в эксплуатации. Но для обеспечения решения этих задач требуется улучшение их точностных характеристик. Опыт работы с этими КСЧ показал, что наиболее оптимальным решением задач, связанных с улучшением точности измерений, является модернизация находящихся в эксплуатации устройств [4, 5]. Разработка новых моделей КСЧ на основе фундаментальных научных исследований очень длительный и дорогостоящий процесс, требующий объединения усилий многих научных групп. Такого запаса времени и средств для решения поставленных задач в наше время нет.

Работа КСЧ на атомах рубидия - 87 основана на принципе подстройки менее стабильной частоты кварцевого генератора по высокостабильной частоте квантового перехода атомов рубидия - 87. В блоке преобразователя частоты формируется сигнал СВЧ возбуждения. Взаимодействие СВЧ поля с атомами рубидия - 87 вызывает их переходы на соответствующий незаселенный уровень. Измеряя населенность этого уровня после взаимодействия с СВЧ полем, можно определить частоту СВЧ поля, при которой вероятность перехода оказывается максимальной. Отношение сигнал/шум (S/N), регистрируемого резонансного сигнала от излученных фотонов на фотодетекторе в этом случае будет максимальным. Полученный сигнал используется для генерации стандартной высокостабильной частоты равной 6834.7 МГц.

Данная частота корректируется с учетом эффектов, приводящих к сдвигам частоты центрального резонанса. Основной вклад в сдвиг частоты центрального резонанса вносят параметры сигнала СВЧ возбуждения. Поэтому к процессу формирования сигнала СВЧ, который подается в зону взаимодействия атомов рубидия-87 с полем по волноводному тракту, необходимо уделять повышенное внимание при модернизации конструкции КСЧ.

Проведенные исследования показали, что точность настройки на резонансную частоту f_0 в КСЧ будет зависеть от шага перестройки частоты $\Delta f_{\text{СВЧ}}$ сигнала СВЧ возбуждения. С учетом этой особенности нами был предложен новый метод формирования кодов подстройки частоты сигнала СВЧ возбуждения в преобразователе частоты, который позволяет существенно уменьшить величину $\Delta f_{\text{СВЧ}}$ по сравнению с ранее используемыми конструкциями КСЧ. Его реализация позволила сделать так, что на точность настройки сигнала СВЧ возбуждения влияет только шаг перестройки дробной частоты, которая формируется в синтезаторе частоты. Проведенные исследования показали, что можно использовать для решения этой задачи разработанную конструкцию синтезатора частоты для стандарта частоты на атомах цезия - 133 [4, 5], но внести в неё небольшие изменения, связанные с формированием численного значения дробной частоты для атомов рубидия - 87. При использовании в КСЧ на атомах рубидия - 87 этой конструкции синтезатора (СЧ) с 10-ти разрядным ЦАПом и тактовой частотой $f_t = 15$ МГц, можно получить $\Delta f_{\text{сч}} \approx 10^{-5}$ Гц. Это дает возможность с высокой точностью подстроить частоту сигнала СВЧ возбуждения на частоту центрального резонанса f_0 (максимум отношения S/N в фотодетекторе).

Также было установлено, что использование нового метода подстройки кодов частоты сигнала СВЧ возбуждения улучшило дисперсию Аллана выходного сигнала КСЧ более чем на 10 % по сравнению с ранее используемыми конструкциями. Это позволяет решать задачи по определению координат объекта с точностью менее 1.5 м.

Литература

1. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. М.: Физматлит, 2009. – 511 с.
2. Соколов С.В., Каменский В.В. Ковалев С.М., Тищенко Е.Н. Использование межспутниковых измерений для высокоточной оценки навигационных параметров объекта. // Измерительная техника. 2017. № 1. С. 19–23.
3. Барышев В.Н., Купалов Д.С., Новоселов А.В., Алейников М.С., Бойко А.И., Пальчиков В.Г., Блинов И.Ю. Малогабаритный квантовый стандарт частоты на рубидиевой ячейке с импульсной оптической накачкой и микроволновым возбуждением по схеме Рэмси. // Измерительная техника. 2016. № 12. С. 33–37.
4. Петров А.А., Давыдов В.В., Гребеникова Н.М. О возможности применения метода прямого цифрового синтеза при разработке синтезаторов частоты для квантовых стандартов частоты // РЭ. 2018. Т. 63. № 11. С. 1159–1164.
5. Lukashev N.A., Petrov A.A., Davydov V.V., Grebenikova N.M., Valov A.P. Improving performance of quantum frequency standard with laser pumping // IEEE Explore Digital Library, Proceedings of 18th International conference of Laser Optics (ICLO-2018), Saint-Petersburg, Russia, 4–8 June 2018, IEEE Catalog number: CFP1836X-ART, P. 271.

КОММУТАТОР ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА В НУКЛОТРОН УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Винник Д.С.

Новосибирский ГУ, Новосибирск, Россия

E-mail: d.s.vinnik@inp.nsk.su

В рамках мегасайенс-проекта «Комплекс NICA» [1] Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) разрабатывает систему питания магнитных элементов для перевода пучка заряженных частиц из Бустера в Нуклотрон.

Импульсное питание системы из магнитных элементов базируется на релаксационном разряде емкостного накопителя источников питания в магниты. Предложен проект коммутатора разряда накопителя в магнит с возвратом накопленной в нём энергии. Для увеличения срока эксплуатации накопителя используется мостовая схема включения на тиристорах, управляемых двухканальными драйверами. Драйвер, включающий в себя генератор управляющих сигналов на основе CPLD матрицы, позволяет отслеживать параметры системы питания и регулировать подачу импульсного питания на магнитные элементы. Номинальное напряжение накопителя 1,8 кВ, ёмкость 3060 мкФ. Параметры выходного импульса: амплитуда тока 600 А, относительная стабильность амплитуды тока 0,05 %, длительность 21 мс, частота повторений импульсов не более 250 МГц.

На текущем этапе фазовое управление тиристорным мостом осуществляется с помощью 13-разрядного АЦП, через делитель снимающего данные по напряжению с емкостного накопителя (пропускная способность – 312,5 kSPS). Программная задержка открытия первой пары тиристоров предназначена для гарантированного отключения зарядного устройства от системы питания. Открытие второй пары тиристоров происходит при выполнении условия, что разность потенциалов между анодом и катодом тиристоров из второй пары достигло определённой отрицательной величины, что создаёт условия для протекания тока через вторую пару тиристоров.

Дополнительно для получения данных о системе питания будет задействован прецизионный датчик тока. В качестве готового решения планируется использовать магнитный компаратор на второй гармонике, ранее разработанный для ускорителя ВЭПП-2М в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Работа такого датчика тока изложена в [2]. Данные о токе, проходящем в индуктивной нагрузке, будут приниматься АЦП и обрабатываться в CPLD матрице, после чего передаваться оператору системы питания для отображения состояния системы и для регулирования подачи импульсов.

Литература

1. Официальный сайт, посвящённый мегапроекту NICA: <http://nica.jinr.ru/ru/>
2. Веремеенко В.Ф. Прецизионные элементы систем питания магнитных структур накопителей заряженных частиц. Новосибирск, 1989.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ СВЧ ИМПУЛЬСОВ В СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

Глазунов П.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: ps.glazunov@physics.msu.ru

Рассматриваются нелинейные эффекты распространения мощных наносекундных СВЧ импульсов ($E \sim 150$ кВ) в слабопроводящих средах, возникающие за счёт индукционного нагрева среды. Под слабопроводящими средами понимаются среды, в которых характерная длина волны излучения много меньше толщины скин-слоя, т. е. $\lambda \ll \delta$. Изменение температуры среды приводит к изменениям ее электродинамических характеристик, таких как диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(u)$ и проводимость $\sigma(u)$. Зависимости этих характеристик от температуры u можно описать в виде соотношений: $\varepsilon(u) \approx \varepsilon(u_0) + \alpha u$, $\sigma(u) \approx \sigma(u_0) + \beta u$, где $\alpha = \partial \varepsilon(u_0) / \partial u_0$, $\beta = \partial \sigma(u_0) / \partial u_0$. Для одиночных наносекундных импульсов СВЧ диапазона выполняется соотношение: $Ta^2/L^2 \ll 1$, где T — продолжительность импульса, L — длина импульса, a — коэффициент температуропроводности. Данное соотношение позволяет пренебрегать распространением тепла за счёт температурных градиентов. Последнее допущение позво-

ляет проинтегрировать уравнение теплопроводности и получить следующие материальные уравнения:

$$\mathbf{D}(t) = \varepsilon \mathbf{E}(t) + \alpha \mathbf{E}(t) \int_{\tau=0}^{\tau=t} \mathbf{E}^2(\tau) d\tau, \quad \mathbf{j}(t) = \sigma \mathbf{E}(t) + \beta \mathbf{E}(t) \int_{\tau=0}^{\tau=t} \mathbf{E}^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

Будем считать, что характеристики импульса зависят лишь от одной координаты, вдоль которой происходит его распространение. Тогда при подстановке соотношений (1) в уравнения Максвелла получается следующее нелинейное уравнение, описывающее распространение электромагнитного импульса в среде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E(x,t)}{\partial t^2} \left[\varepsilon + \alpha \int_{\tau=0}^{\tau=t} E^2(x,\tau) d\tau \right] + \\ + \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \left[\sigma + \beta \int_{\tau=0}^{\tau=t} E^2(x,\tau) d\tau + 4\alpha \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} E^2(x,t) \right] + \beta E^3(x,t) \end{aligned} \quad (2)$$

Численное моделирование процесса показало, что при характерных для эксперимента значениях $T \sim 10$ нс, $\alpha/\varepsilon \sim 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, $\beta/\sigma \sim -10^{-3} \text{ К}^{-1}$, $\sigma \sim 10^{-3} \text{ См/м}$ интегральными нелинейностями в выражении (2) можно пренебречь. Происходит это из-за незначительного нагрева среды, что позволяет отнести данное нелинейное взаимодействие электромагнитного поля со средой к нетепловым воздействиям. Под нетепловым воздействием понимается воздействие, которое не приводит к нагреву образца в целом.

Таким образом, при моделировании следует учитывать кубическую нелинейность, из-за наличия которой возникает генерация третьей гармоники, а также нелинейность, связанную со скоростью нагрева вещества, влияющую на поглощение средой энергии электромагнитной волны.

Стоит отметить, что нетепловое воздействие микроволнового излучения является недостаточно изученным. Его исследование представляет огромный интерес для широкого класса специалистов, изучающих такие процессы, как нетепловое воздействие электромагнитных импульсов на биологические [1-3] и радиотехнические [4-6] объекты, дезинтеграцию упорных минеральных руд [7-8], спектроскопию водных растворов [9] и др.

Литература

1. А.А. Шпак, В.А. Новиков Исследования влияния электромагнитных полей (ЭМП) и электромагнитных излучений (ЭМИ) на биообъекты // Биомедицинская инженерия и электроника, 2017, № 4.
2. Быстров Р.П. и др. Электромагнитные системы и средства преднамеренного воздействия на физические и биологические объекты // РЭНСИТ, 2014, Т. 6, № 2.
3. Р.Н. Никулин. Исследование воздействия СВЧ-излучения низкой Интенсивности на биологические объекты // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26–30 октября 2009 г.
4. А.М. Ходаков, В. А. Сергеев Оценка в рамках теплоэлектрической модели стойкости светодиода к воздействию периодической последовательности СВЧ импульсов // Журнал Радиоэлектроники, ISSN 1684-1719, N 10, 2017.
5. З.М. Гизатуллин и др. Повышение помехоустойчивости электронных средств при электромагнитных воздействиях по сети электропитания // Журнал Радиоэлектроники, N 6, 2015.
6. А.М. Ходаков и др. Теплоэлектрические процессы в гетеропереходном светоизлучающем диоде при воздействии на него мощного импульсного СВЧ излучения // Журнал Радиоэлектроники, ISSN 1689–1719 N 3, 2017.

7. В.А. Вдовин, Ю.В. Гуляев, В.А. Черепенин, В.А. Чантурия. Нетепловое воздействие мощных электромагнитных импульсов на золотосодержащую горную породу // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 9. с. 1129–1133.
8. В.А. Чантурия и др. Использование мощных электромагнитных импульсов в процессах дезинтеграции и вскрытия упорного золотосодержащего сырья // Физико-технические проблемы обогащения полезных ископаемых. 2001. № 4. с. 95–106.
9. Л.Д. Гапочка, и др. Воздействие электромагнитного излучения КВЧ- и СВЧ-диапазонов на жидкую воду // Вестник московского университета, сер.3, Физика. Астрономия, 1994, Т. 35, № 4.

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ В ВОДЕ НА ХАРАКТЕР ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ НАД ЕЁ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Горячкин П.А.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
mesteryo2@gmail.com*

К настоящему времени выполнено достаточно большое число экспериментальных работ, посвященных исследованию процесса распространения импульсного разряда над поверхностью воды [1–3]. Данная работа является продолжением таких работ и посвящена изучению процесса распространения разряда при различных величинах водяного столба под поверхностью электродов. Для создания разряда использовался генератор, позволяющий получать импульсы квазипрямоугольной формы длительностью (10–1000) мкс при начальном напряжении в импульсе (5–30) кВ. Высоковольтный отрицательный электрод располагался над поверхностью воды, а плоский заземленный электрод размещался непосредственно в жидкости на различных расстояниях относительно ее поверхности. При этом расстояние между электродами по горизонтали было постоянно и равнялось 30 мм. Экспериментально определялась зависимость минимального напряжения, при котором реализуется завершённый разряд, от глубины погружения отрицательного электрода (рис. 1).

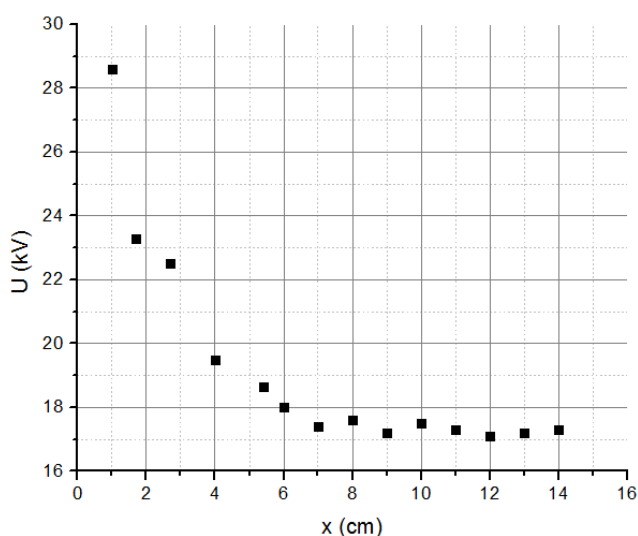


Рис. 1. Зависимость минимального напряжения необходимого для инициализации завершённого разряда от x глубины погружения подводной части катода.

Из приведенного рисунка следует, что при удалении от поверхности воды подводной части катода наблюдается уменьшение необходимого минимального напряжения, что связано тем, что при малых значениях x развитие разряда определяется поперечной

(перпендикулярной к поверхности воды) составляющей напряжённости электрического поля. В то время как при $x > 7$ см развитие разряда полностью определяется продольной (параллельной поверхности воды) составляющей напряженности электрического поля

Литература

1. Белошеев В.П. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 7. С. 44.
2. А.М. Анпилов, Э.М. Бархударов, В.А. Копьев, И.А. Косый. // Физика Плазмы 2006, Т. 32, Вып.11, С. 1048.
3. Александров А.Ф., Ваулин Д.Н., Ершов А.П. и др. // Вестник МГУ, серия Физика, Астрономия, 2009 .№ 1, С 1.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ПЛАЗМЕННОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СВЧ-ИСТОЧНИКА

Диас Михайлова Д.Е.^{1,2}, Иванов И.Е.², Стрелков П.С.²,
Тараканов В.П.^{3,4}, Шумейко Д.В.²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

⁴НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия,

E-mail: tomasrulit@mail.ru

Разработан принципиально новый источник сверхширокополосного СВЧ излучения, основанный на усилении собственных шумов релятивистского электронного пучка (РЭП) при инжекции его в плазму. В таком источнике средняя частота СВЧ излучения определяется плотностью плазмы, что позволяет получать сверхширокополосные $\Delta f / 0.5(f_{\min} + f_{\max}) = 0.55 > 0.22$ СВЧ сигналы с длительностью импульса 200–300 нс, а также осуществлять перестройку средней частоты излучения от одного импульса тока РЭП к другому в диапазоне от 2.2 до 3.8 ГГц. Здесь $f_{\max}$ и $f_{\min}$ границы спектра, отсчитываемые по уровню 10 Дб

Показано, что эффективный потенциал плазменного источника сравним с эффективными потенциалами существующих источников сверхширокополосных СВЧ импульсов, описанных, например, в [1], и равен 400 кВ для сигнала со средней частотой 3 ГГц.

Также решена проблема измерения полной энергии СВЧ импульса при помощи калориметра. На малых расстояниях между калориметром и рупором волна не плоская и поэтому значительная доля излучения отражается от калориметра. На больших расстояниях только малая доля энергии излучения попадает на калориметр из-за расходимости СВЧ пучка. Предложена новая схема измерения, для измерения полной энергии СВЧ импульса.

Экспериментально подобрана длина штыревой антенны, которой соответствует максимальная полоса пропускания. Численное моделирование при помощи кода «КАРАТ» подтвердило, что полученное экспериментально значение длины антенны 35 мм является оптимальным.

Было доказано, что спектр плазменного излучателя определяется спектром колебаний тока, формируемого на взрывоэмиссионном катоде и полосой усиления плазменного релятивистского усилителя. Это утверждение следует из анализа автокорреляционных функций СВЧ сигналов, регистрируемых в вакууме и в плазме.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант № 19-08-00625

Литература

1. В.П.Беличенко, Ю.И.Буянов, В.И.Кошелев. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Новосибирск: "Наука", 2015.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕШАЮЩИХ СИГНАЛОВ НА КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ СТАНДАРТА IEEE 802.11n ПО ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB

Титов К.Д., Завалишина О.Н.

ВГУ, физический факультет, Воронеж, Россия

E-mail: titovkd@bk.ru

Перспективные стандарты передачи данных основаны на использовании современных технологий, включающих в себя многоуровневые модуляции, помехоустойчивое кодирование и многоканальную передачу [1,2]. Использование данных методов позволяет повысить пропускную способность канала связи и передавать информацию на более высоких скоростях, но при этом требует более высоких отношений сигнал/шум на входе приёмника. Предельные значения отношения сигнал/шум для различных видов модуляции определены в спецификации стандарта IEEE 802.11 [4], однако влияние узкополосных помех различной мощности на канал связи стандарта IEEE 802.11n до сих пор остаётся неизученным. В связи с этим, актуальной задачей является построение в среде MATLAB Simulink имитационной модели беспроводного канала передачи данных, широко используемого в настоящее время стандарта IEEE 802.11n, а также верификация результатов, полученных по результатам моделирования аналитическими выражениями, с целью оценки влияния помех на канал передачи данных.

В работе проанализирована модель беспроводного канала на примере современного стандарта IEEE 802.11n. Модель включает себя передатчик, который формирует пакет данных и передает в канал связи, где с помощью блока AWGN задается уровень шума. Далее создаётся узкополосная помеха заданной мощности относительно уровня сигнала и добавляется к аддитивной смеси сигнала и шума. Сформированная реализация поступает на вход приёмника, часть искажённой информации вследствие воздействия помех восстанавливается свёрточным кодером, который формирует последовательность принятых бит. Сравнение исходной последовательности и последовательности, после воздействия на неё помех в канале связи, позволяет определить вероятность битовой ошибки в зависимости от мощности помехи и количества зашумленных поднесущих (ширины полосы спектра помех).

Для подтверждения достоверности моделирования были проведены аналитические расчёты. Для оценки помехоустойчивости непосредственно самого стандарта IEEE 802.11n исследована структура битового потока, формируемого на канальном и физическом уровне сетевой модели [3] для определения количества полезной и служебной информации, без учёта типа передаваемого сообщения и протоколов на верхних уровнях. Рассчитывались вероятности битовой ошибки для многоуровневых модуляций M-PSK и QAM. Для учёта воздействия узкополосных помех полученные соотношения переписывались как зависимость вероятности битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности помехи с учётом ширины её спектра. Затем учитывалась исправляющая способность свёрточного кодера на входе приёмника и рассчитывалась декодированная вероятность битовой ошибки [1]. По результатам анализа, аналогично результатам моделирования, в общем виде рассчитывалась вероятность битовой ошибки как функция от отношения спектральных плотностей мощности сигнала и аддитивной смеси шума и помехи, и ширины полосы спектра помехи. Теоретические расчёты с приемлемой точностью подтверждают результаты моделирования.

По результатам моделирования была получена зависимость вероятности битовой ошибки от степени перекрытия сигнала помехой (рис. 1). Определена минимальная ширина полосы помехи (количество зашумленных поднесущих) фиксированной мощности в зависимости от требуемой вероятности искажения, при которой система связи и передачи данных может функционировать.

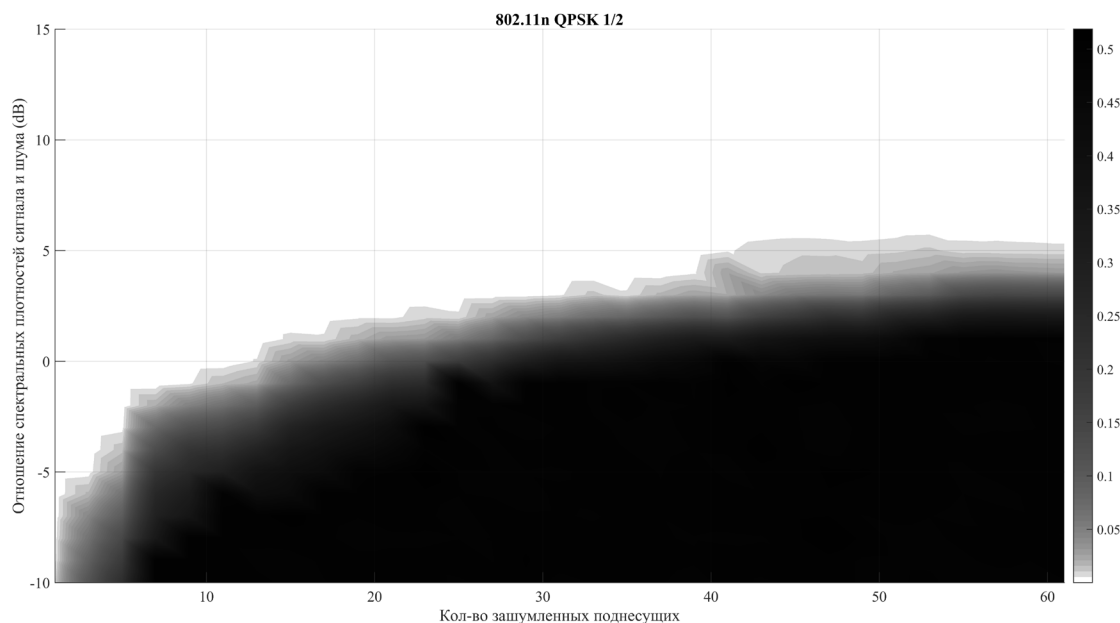


Рис. 1. Зависимость вероятности битовой ошибки от количества зашумленных поднесущих и отношения спектральной плотности мощности сигнала и помехи

Полученные результаты позволяют установить границу критического влияния помех и могут быть использованы для адаптации алгоритмов приёмника в интересах повышения качества передачи информации.

Литература

1. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика). М., 2012.
2. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети: Пер. с англ. М., 2003.
3. Филимонов А.Ю. Построение мультисервисных сетей Ethernet. М., 2007.
4. IEEE Std. 802.11-2012, IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and Information Exchange between Systems — Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, March (2012).

ШИРОКОАПЕРТУРНАЯ ГЕОМЕТРИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МОНОКРИСТАЛЛЕ БРОМИДА РТУТИ

Зинкин Д.В., Пороховниченко Д.Л.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: zinkin.deniz@yandex.ru

Известно, что кристаллические соединения на основе ртути и теллура находят широкое применение в акустооптике для управления характеристиками электромагнитного излучения в видимом, а также инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра [1, 2]. Такие кристаллы, как теллур (Te), парателлури́т (TeO_2), каломель (Hg_2Cl_2), бромид ртути (Hg_2Br_2) и др., характеризуются исключительно высокими значениями ко-

эффекта акустооптического качества, что значительно снижает требования к уровню управляющей электрической мощности в акустооптических приборах на основе ртуты и теллура [1–3]. Поэтому исследование физических свойств указанных кристаллов является актуальной проблемой. Задачей настоящей работы явился анализ акустооптических характеристик кристалла бромида ртути в режиме широкоапертурной дифракции света на ультразвуке.

В работе приводятся результаты расчетов фазовых скоростей акустических волн в плоскостях (010) и (1–10) кристалла. Расчет показал, что фазовая скорость медленных сдвиговых акустических волн сильно меняется в зависимости от направления распространения звука и может достигать весьма низкого значения $V = 273$ м/с. Для плоскостей (010) и (1–10) кристалла бромида ртути были рассчитаны зависимости угла Брэгга θ от акустической частоты f при распространения ультразвука под различными углами α относительно кристаллографических осей. Анализ проведен для длин волн оптического излучения в видимом световом диапазоне $\lambda = 633$ нм, а также и в инфракрасном диапазоне $\lambda = 10.6$ мкм. В результате проведенных расчетов были определены оптимальные углы падения света, а также значения акустических частот, соответствующих режимам широкоапертурной дифракции света в бромиде ртути.

Проведенное исследование позволяет определить основные параметры новых акустооптических дефлекторов и фильтров видимого и инфракрасного диапазонов электромагнитного спектра, которые в ближайшее время планируется создать на основе кристаллов бромида ртути.

Литература

1. Xu J., Stroud R. Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1992.
2. Amarasinghe P.M., Kim J.-S., Trivedi S., et al. Long Wavelength Infrared (LWIR) AOTF and AOM Using Hg_2Br_2 Crystals // Proc. SPIE. 2017. V. 10404. P. 104040T-1–104040T-7.
3. Gottlieb M., Goutzoulis A., Singh N.B., et al. Optic and Acousto-optic Properties of High-performance acousto-optic materials: Hg_2Cl_2 and PbBr_2 // Optical Engineering. 1992. V. 31(10). P. 2110–2019.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕННОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Ивандиков Ф.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: Dr.Leprikon@yandex.ru

Определяющий показатель ракетного двигателя — его тяга. Она в свою очередь определяется плотностью извергаемого материала и его энергией. В работе рассматриваются методы получения значений энергии ионов выхлопа в плазменном ракетном двигателе.

Сеточный энергоанализатор позволяет получить функцию распределения ионов плазмы по энергиям. Прибор состоит из корпуса, коллектора и сеток под разными потенциалами, информация с инструмента поступает в виде ВАХ — кривой запираания, производная которой даёт функцию распределения.

Погрешности в измерениях сеточного анализатора возникают по ряду причин: скопление объёмного заряда между сетками, провисание потенциала в зазорах сетки, вторичная эмиссия, отклонение траекторий ионов от оси анализатора.

Для калибровки и уточнения результатов измерений сеточным энергоанализатором в эксперименте использовался электростатический цилиндрический энергоанализатор. Обычно прибор используется при измерении высоких энергий — порядка десят-

ков кЭв, но при определённых модификациях возможно его применение в работе с частицами низких энергий.

Принцип работы цилиндрического энергоанализатора следующий: поток заряженных частиц проходит через зазор между двумя пластинами цилиндрической формы, на которые поданы потенциалы разных знаков. Траектория частиц загибается электрическим полем между обкладками, частицы диапазона пропускания проходят на коллектор, частицы вне диапазона падают на стенки анализатора. Диапазон пропускаемых энергий определяется отношением (1)

$$\frac{\Phi}{d} = \frac{W}{r_0}, \quad (1)$$

где Φ — потенциал на обкладках, d — расстояние между обкладками, r_0 — радиус кривизны.

Из-за низкой энергии рассматриваемых ионов искривление поля на входе в анализатор сбивало траектории частиц, что слишком сильно ослабляло сигнал. Во избежание этого на обкладки был подан смещающий ускоряющий потенциал порядка -100 В, таким образом исключается влияние на траектории краевых эффектов, для учёта дополнительного вклада энергии полученный спектр смещается на ускоряющее напряжение.

Для оценки погрешностей сеточного и цилиндрического анализаторов в работе представлены результаты компьютерного моделирования траекторий заряженных частиц, выполненные в программе SIMION. Для визуализации электростатических полей также использовалась программа FEMM. Ниже приведены некоторые из полученных изображений.

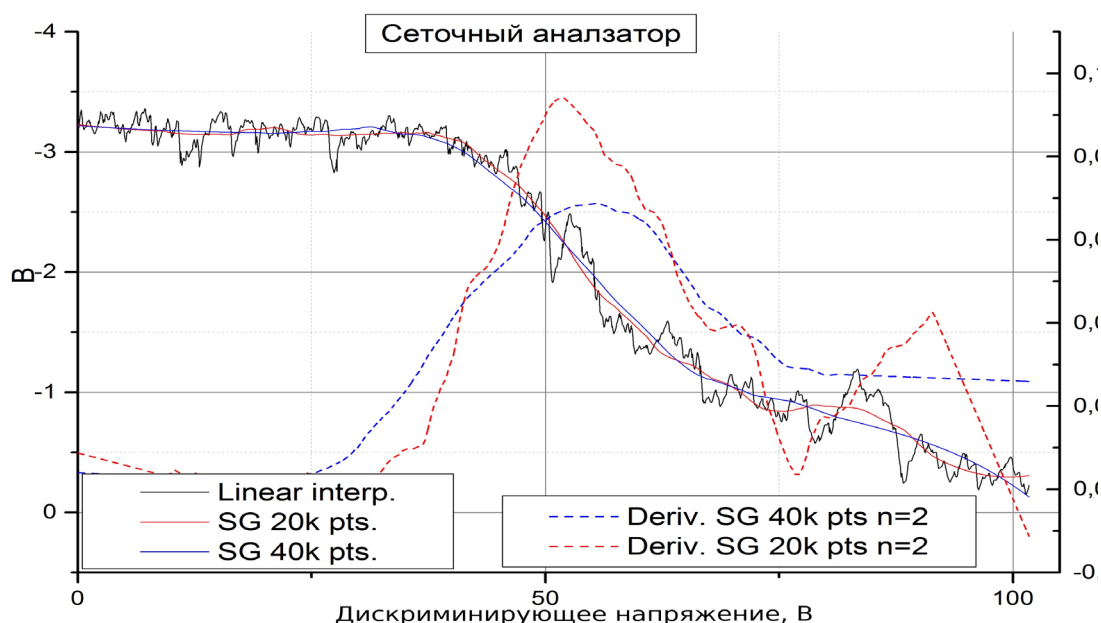


Рис. 1- ВХ сеточного анализатора (данные с АЦП и сглаженные) — сплошные линии, и её производная — пунктирные линии.

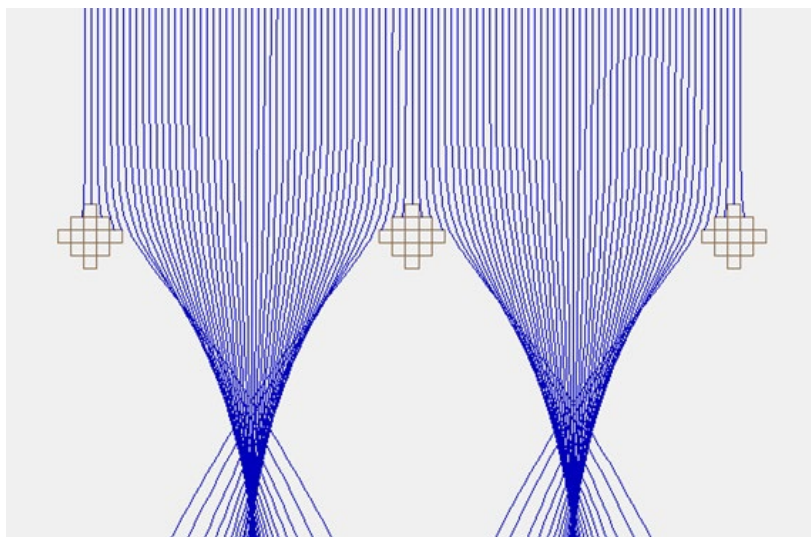


Рис. 2. - Траектории частиц с энергией больше потенциала, поданного на сетку (сеточный энергоанализатор).

Литература

1. Francis F. Chen, Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics // Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles, 2003.
2. Hutchinson I.H., Principles of Plasma Diagnostics // Massachusetts Institute of Technology, 1987.
3. Bolton Ferda, Retarding Potential Analyzer Theory and Design // Princeton University, 2015.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ МДС С НАНОМЕТРОВЫМ ПРОВОДЯЩИМ ПОКРЫТИЕМ

Иванов Р.А., Морозов С.И., Фитаев И.Ш.

КФУ им. В.И.Вернадского, Физико-техн. институт, Симферополь, Россия

E-mail: madara-09@bk.ru

В настоящее время большой интерес уделяется вопросу работоспособности радио-электронной аппаратуры при воздействии на нее электромагнитных полей, как направленного, так и естественного происхождения. В современной аппаратуре все манипуляции с сигналами производятся в интегральных микросхемах (ИМС), таким образом вопросы её надежного функционирования приводят к исследованию физических явлений в ИМС при воздействии электромагнитных полей (ЭМП). Учитывая активное развитие полупроводниковой электроники, актуальными являются исследования металло-диэлектрических структур (МДС) с нанометровым проводящим покрытием при воздействии на них электромагнитного излучения [2,3]. Тонкие проводящие пленки являются объектом особого интереса не только в полупроводниковой электронике, но и в области защиты устройств радиотехнического назначения от воздействия внешних СВЧ-излучений, так как они используются в ИМС в качестве контактных площадок, контактов полупроводниковых приборов, соединений между активными элементами. Причем для этого могут использоваться более пяти слоев из проводящих пленок. Проводящие пленки являются неотъемлемой конструктивной составляющей для приборов, модулей и различных СВЧ-устройств. Для экранирования радиотехнических устройств также используются проводящие пленки.

В качестве исследуемых образцов использовались твердые МДС, с $S = 15 \times 15$ мм, полученные методом ионного напыления [1], представляющие собой ситалл, исполь-

зующийся в качестве подложки на который нанесен нанометровый слой алюминия. Образцы МДС устанавливались посередине волновода 72×34 перпендикулярно его оси. $f = 3$ ГГц.

Исследуемой характеристикой являлся оптический коэффициент, представляющий собой относительную мощность отраженной волны ($R = P_{OTR}/P_{ПД}$). Из рисунка 1 видно, что с увеличением толщины проводящего покрытия растет и мощность отраженной волны, а при достаточно малой толщине проводящего слоя мощность отраженной волны практически нулевая.

В данной работе нам удалось осадить металлические пленки на твердые подложки и показать, что такие структуры могут весьма эффективно взаимодействовать с электромагнитным полем. Следствием данных результатов может быть разработка новых (инновации сделаны выводы о том, что при достижении определенной толщины напыления отраженная мощность может превышать отраженную мощность толстой алюминиевой пластины а так же образца представляющего собой алюминиевую фольгу.

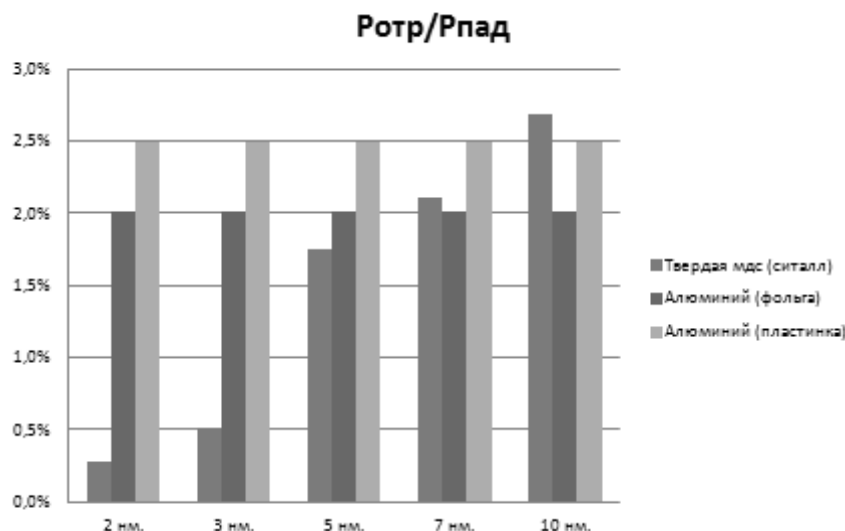


Рис. 1. Зависимость R от толщины напыления, а так же сравнения их с образцами алюминиевой фольги и пластинки аналогичных геометрических размеров.

Литература

1. Арсеничев С.П. Дифракция электромагнитного излучения на тонких проводящих пленках металлodieлектрических структур в прямоугольном волноводе / С.П. Арсеничев [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2017 г., т. 22, № 2. С.48–53.
2. Арсеничев С.П. Особенности измерения оптических коэффициентов нанометровых пленок волноводными методами / С. П. Арсеничев [и др.] // Материалы 28-й Международ. крымской конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМи-Ко’2018) (28; 2018 г.; Севастополь). – Севастополь, 2018. – С. 2013–2018.
3. Metal Based Thin Films for Electronics / Ed. K. Wetzig, C. M. Shneiker. Ch.2. Thin Films System: Basic Aspects. Wiley – VCX, 2003. – 378 p.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ В ДИСКОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ РЕЗОНАТОРАХ, ВНОСИМЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Клочков Я.Ю.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
E-mail: klochkov.jj15@physics.msu.ru

В 2015 году гравитационно-волновые детекторы LIGO зарегистрировали сигнал, порождённый слиянием двух черных дыр [1].

В следующем поколении интерферометрических детекторов для увеличения чувствительности запланировано изготовить охлаждаемые жидким азотом пробные массы из монокристаллического кремния. Кремний обладает малыми механическими потерями; высокой теплопроводностью, обеспечивающей малые градиенты температуры в пробной массе (она подвергается неоднородному нагреву лазером) и имеет ещё одну замечательную особенность: вблизи температуры 123 К коэффициент теплового расширения кремния проходит через нуль, тогда термоупругие шумы пробных масс будут подавлены [2].

Для тонкой настройки интерферометра предусмотрены электростатические актюаторы, регулирующие положение пробных масс. Так как кремний обладает конечным сопротивлением, то воздействие актюаторов на пробные массы может приводить к перераспределению зарядов на последних, возникновению в них токов, и, как следствие, увеличению механических потерь и шумов [3], поэтому нужно оптимизировать конструкцию актюатора и пробной массы для минимизации потерь при сохранении достаточной эффективности актюатора.

Мы моделируем взаимодействие пробной массы с электродами актюатора с помощью кремниевого дискового резонатора [4] и текстолитовой пластины с вытравленными на ней четырьмя электродами, каждый из которых имеет форму кольцевого сектора. Цель работы – изучить зависимость механических потерь в кремнии от характера легирования и ориентации кристаллографических осей, отделив их от потерь, связанных с конкретной реализацией прототипа.

В ходе экспериментального исследования механических потерь на модели (дисковом резонаторе из кремния диаметром 50,8 мм; толщиной 0,28 мм, удельным сопротивлением при комнатной температуре — 10 Ом·см) в электростатическом поле (напряженность поля порядка 1 МВ/м, зазор между резонатором и электродами порядка 0,3 мм) было получено (при комнатной температуре и вакууме около 10^{-5} Торр), что вносимые полем потери (Q_{el}^{-1}) зависят от конфигурации электродов и могут достигать величины порядка 10^{-4} . При охлаждении жидким азотом потери уменьшались.

Полученные значения потерь пока не согласуются с рассчитанными, в частности, по механизму, рассмотренному в [3]; в дальнейшем планируется продолжение измерений и уточнение модели потерь.

Литература

1. B.P. Abbott et al., Observation of gravitational waves from a binary black hole merger // Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).
2. R. Adhikari et al., LIGO Voyager upgrade: design concept LIGO technical note // T1400226-v9 (2018).
3. M. Imboden, P. Mohanty, Dissipation in nanoelectromechanical systems // Physics Reports 534 (2014) 89-146
4. G. Vajente et al., A high throughput instrument to measure mechanical losses in thin film coatings // Rev. Sci. Instrum. 88, 073901 (2017)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Костылева Е.И., Манцевич С.Н.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
E-mail: katyakostyleva@mail.ru, snmantsevich@yahoo.com

На сегодняшний день класс оптоэлектронных приборов, функционирование которых основано на использовании акустооптического (АО) эффекта, широко используются для анализа и управления различными параметрами световых пучков [1]. Акустооп-

тические устройства ввиду их компактности, малой потребляемой мощности и надежности нашли применение при создании компактных оптоэлектронных приборов, используемых не только в лабораторных условиях, но и в полевых условиях, а также в космическом пространстве [2].

Одной из особенностей, возникающих при применении АО приборов вне лабораторий, при отсутствии их температурной стабилизации, является широкий диапазон рабочих температур, зачастую превышающий 100 градусов.

Свойства кристаллических анизотропных сред, на основе которых изготавливаются АО приборы, зависят от температуры [3]. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния температуры на характеристики АО устройств, в особенности АО фильтров — определение температурных зависимостей различных параметров АО фильтрации гарантирует корректность анализа полученных научных данных.

Существует два механизма изменения температуры АО кристалла: нагрев вследствие поглощения материалом АО ячейки мощности возбужденного в ней акустического пучка [4] и нагрев или охлаждение под влиянием температуры окружающей среды [5]. Затухание акустических волн в сильно акустически анизотропной среде не может быть описано в рамках классической теории, сформулированной для акустически изотропных сред. В первом случае внутри АО кристалла возникают температурные градиенты, наличие которых приводит к вариациям условий АО дифракции внутри АО ячейки, что искажает вид аппаратной функции и мешает точному анализу экспериментальных данных. Во втором случае температура может быть стабилизирована, что позволяет исследовать изменение характеристик акустооптических сред, в первую очередь, скорости распространения акустических волн, с температурой и характер влияния этих изменений на функционирование АО фильтров [3].

В данной работе экспериментальные и теоретические исследования влияния температуры проведены для АО фильтра изготовленного на основе кристалла диоксида теллура, известного экстремально большой анизотропией акустических свойств [6].

Литература

1. J. Xu, R. Stroud, Acousto-optic devices, Wiley, New York, 1992
2. O.I. Korablev et al., SPICAM IR acousto-optic spectrometer on Mars Express, // J. Geophys. Res., 2006, E 111, E09S03
3. S.N. Mantsevich, E.I. Kostyleva Examination of the temperature influence on phase matching frequency in tunable acousto-optic filters // Ultrasonics, 2019, v. 91, p. 45–51.
4. С.Н. Манцевич, Т.В. Юхневич, В.Б. Волошинов Исследование влияния температуры на функционирование акустооптических фильтров // Оптика и спектроскопия, 2017, т. 122, № 4, с. 694–700.
5. S.N. Mantsevich, O.I. Korablev, Yu. K. Kalinnikov, A.Yu. Ivanov, A.V. Kiselev Wide-aperture TeO₂ AOTF at low temperatures: Operation and survival // Ultrasonics, 2015, v. 59, p. 50–58.
6. Y. Omachi, N. Uchida, N. Niizeki Acoustic wave propagation in TeO₂ single crystal // J. Acoust. Soc. Am., 1972, v. 51, p. 164–168.

ШИРОКОПОЛОСНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Кучумов И.Д.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
E-mail: ikuchum@gmail.com

Акустооптические устройства находят широкое применение в устройствах управления параметрами электромагнитного излучения [1,2]. Эти приборы успешно исполь-

зуются в оптике, спектроскопии, лазерной технике, оптической обработке информации и др. В последние годы активно применяются перестраиваемые акустооптические фильтры, позволяющие работать со световыми пучками, формирующими оптические изображения. Известно, что диапазон перестройки фильтров по оптическим длинам волн определяется электрическим частотным диапазоном работы пьезоэлектрических преобразователей [2,3]. Данный диапазон может быть существенно расширен при использовании электрических согласующих цепей. Эти цепи включаются в электрическую цепь между генератором управляющей ВЧ мощности и пьезоэлектрическим преобразователем акустооптической ячейки. Синтез подобных согласующих цепей является достаточно сложной физической и технической проблемой [1].

В докладе исследуется работа пьезоэлектрического преобразователя акустооптического фильтра для анализа оптических изображений. Преобразователь был изготовлен из тонкой пластины кристалла ниобата лития (LiNbO_3) X-среза и прикреплен к кристаллу парателлурита (TeO_2). Преобразователь генерировал в кристалле TeO_2 сдвиговые акустические волны в диапазоне частот ультразвука $f = 80 - 160$ МГц. При моделировании работы преобразователя использована стандартная электрическая схема, состоящая из последовательного LCR -контура, шунтированного статической ёмкостью C_0 [1]. При проведении исследований были экспериментально определены номиналы электрических элементов эквивалентной схемы преобразователя. На основе полученных данных была также рассчитана частотная зависимость реальной ReZ и мнимой ImZ части электрического импеданса преобразователя. Наконец, были определены и номиналы электрических элементов согласующей цепи, а также реальная и мнимая часть электрического импеданса преобразователя с согласующей цепью.

Проведенное исследование позволяет оптимизировать рабочие параметры акустооптических приборов. При подобной оптимизации в дефлекторах может быть получено увеличение максимального числа разрешимых элементов. В случае акустооптических фильтров реально ожидать расширения диапазона перестройки приборов по оптическим длинам волн.

Литература

1. Xu J., Stroud R. Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications. New York. John Wiley & Sons, Inc. 1992.
2. Gupta N., Voloshinov V.B. Development and Characterization of Two-Transducer Imaging Tunable Acousto-Optic Filters With Extended Tuning Range // Applied Optics. 2007. V. 46(7). P. 1081–1088.

УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНОГО МИКРОВОЛНОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА ИОНАХ Hg^+

Лукашев Н. А.

С-Пб ПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: n-lukash@list.ru

В настоящее время стандарты частоты являются неотъемлемым элементом: любых высокоточных систем определения координат объекта, системы единого времени, системы передачи и обработки информации, работы различных метрологических служб [2,3,5]. Особое место отводится малогабаритным стандартам частоты, которые могут выдерживать различные перегрузки при полете удаленных космических кораблей или посадке космических аппаратов на другие планеты солнечной системы или их спутники (например, Луна и т.д.). Необходимо также отметить, что в большинстве случаев сеанс связи этой станции или аппарата с орбитальными спутниками Земли или наземными станциями длится короткое время. За этот промежуток времени необходимо послать

на большое расстояние огромный объем информации с высокой скоростью. Это обстоятельство накладывает определенные условия на значение рабочей частоты стандарта, который располагается на борту данного объекта. Кроме того, шкала времени стандарта на космической станции или аппарате должна быть синхронизирована по времени со шкалами орбитальных спутников Земли, принимающих с них сигналы. Это необходимое условие для определения координат станции в космосе или аппарата на другой планете.

В работе [6] были проведены подробные исследования различных диапазонов станций и определено, что диапазон от 40 до 75 ГГц загружен лишь на 5% по сравнению с другими (S, X и т.д.). Это уменьшит количество помех различного рода, которые могут ухудшить отношение сигнал/шум при регистрации полезного сигнала с информацией.

Микроволновый стандарт на ионах ртути $^{199}\text{Hg}^+$ является одним из наиболее оптимальных решений этой задачи [3], как по точностным характеристикам, так и по устойчивости к перегрузкам. Единственным недостатком для данного конкретного применения стандарта являются их большие массогабаритные характеристики. Их уменьшение приводит к снижению точности воспроизведения частоты стандарта. Поэтому задача модернизации данного стандарта для уменьшения его массогабаритных характеристик и повышения точностных, крайне актуальна.

Основным блоком микроволнового стандарта на ионах ртути $^{199}\text{Hg}^+$ является ионная ловушка. В ней удерживаются необходимое число ионов $^{199}\text{Hg}^+$ на определенном уровне, чтобы они при взаимодействии с излучением на $\lambda = 194.2$ нм испустили определенное число фотонов, которое регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) [1]. От качества захвата ионов в ловушке зависит кратковременная и долговременная стабильность частоты стандарта. При уменьшении массы и габаритов магнитной ловушки необходимо обеспечить надежное управление её параметрами. Для изготовления малогабаритной магнитной ловушки в виде $n=4$ -поля с радиусом $r_0=0.7$ см на основе конструкции ловушки Пауля [2, 3], мною был разработан новый блок для управления переменным электромагнитным полем, которое обеспечивает захват заряженной частицы.

При проектировании данного блока нами были выполнены предварительные расчеты. Заряженные частицы в магнитной ловушке захватываются эффективным потенциалом:

$$V_{\text{eff}} = \frac{n^2}{4} \frac{V_0^2}{r_0^2 \Omega^2} \frac{q^2}{m} r^{2n-2}$$

Захват частицы с единичным зарядом $q=e_0$ будет ограничен по массе m : сверху — глубиной эффективного потенциала и снизу — средней продолжительностью времени захвата частицы, выраженной адиабатическим параметром η . Требования к амплитуде напряжения V_0 выполняются при:

$$\Omega \geq \Omega_{\min} = \frac{n-1}{3r} \frac{\sqrt{E_m}}{r_0} \frac{\sqrt{m_{\max}}}{m_{\min}}$$

Полученные результаты показали, что ловушка надежно работает при числе регистрируемых фотонов от 10^4 до $5 \cdot 10^5$ и при следующих параметрах: частота операционного сигнала Ω , используемого для контроля работы магнитной ловушки должна находиться следующем диапазоне: $0.74 \div 1.60$ МГц а его амплитуда $V_0 = 120 \div 200$ В при кинетической энергии частиц $E_m = 0.2 \div 10$ эВ.

Для авторегулировки параметров управляющего напряжения на катушках магнитной ловушки нами была разработана новая программа на языке Си для контроллера серии MCS-51, которая позволяет по результатам подсчета числа фотонов, зарегистриро-

ванных ФЭУ [4] в определенный промежуток времени выдать соответствующие команды для корректировки параметров операционного сигнала.

Проведенные измерения с использованием разработанного нового блока показали, что в спектрах управляющих напряжений не содержится существенных паразитных составляющих, которые могут повлиять на устойчивую работу магнитной ловушки.

Проведенная разработка позволила, наряду с переходом на электронные компоненты отечественного производства, улучшить характеристики по стабильности частоты стандарта на средних интервалах измерения (от 100 до 10000 секунд) на 10%, а на длительных интервалах (1 сут) на 7% по сравнению с ранее использовавшимися конструкциями.

Литература

1. Дубинов А.Е., Мытарева Л.А., Сайков С.К., Селемир В.Д. «Оптимальный ток пучка ионов в установках разделения изотопов электромагнитным методом», РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2013, с. 169–170.
2. Одуан, Гино «Измерение времени. Основы GPS», Техносфера, Мир связи, 2002 г., 400 с.
3. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 511 с.
4. Amelis Detti, Marco De Pas, Lucia Duca, Elia Perego, Carlo Sias, «A compact radiofrequency drive based on interdependent resonant circuits for precise control of ion traps», Physics.Atom-ph, 2018.
5. Petrov, A.A., Davydov, V.V., Grebenikova, N.M. Some Directions of Quantum Frequency Standard Modernization for Telecommunication Systems // Lecture Notes in Computer Science 2018. 11118 LNCS, pp. 641–648.
6. Podstrigaev, A.S., Smolyakov, A.V., Davydov, V.V., Myazin, N.S., Slobodyan, M.G. Features of the Development of Transceivers for Information and Communication Systems Considering the Distribution of Radar Operating Frequencies in the Frequency Range. Lecture Notes in Computer Science . 2018.

СИСТЕМА ОБРАБОТКИ БОЛЬШОГО МАССИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПЭС В ИОНОСФЕРЕ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ПРИВОЛЖСКОЙ СЕТИ ГНСС СТАНЦИЙ

Максимов Д.С.

Казанский (Приволжский) ФУ, институт физики, Казань, Россия

E-mail: meinica_macs@mail.ru

Изучение неоднородной структуры ионосферы, связанной как с естественными, так и искусственными возмущениями играют существенную роль при решении задач радиосвязи, радиолокации, радионавигации, а также при прогнозировании землетрясений, магнитных бурь и других процессов, связанных с космической погодой.

Существует разделение ионосферных возмущений по типам: крупномасштабные, среднемасштабные и мелкомасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения, помимо их существуют также неоднородности промежуточного масштаба, ударно-акустические волны и внезапные ионосферные возмущения. Все они генерируются в результате различных физических явлений, происходящих как в пределах Земли, так и вне их. Например, крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения возникают в результате мощных магнитных бурь, а ударные акустические волны генерируются при землетрясениях, вулканических извержениях, запусках космических аппаратов.

Одну из ведущих ролей в исследованиях ионосферы и ионосферных неоднородностей играют радиофизические методы зондирования: вертикальное и наклонное зонди-

рование, измерения доплеровского сдвига частоты, метод некогерентного рассеяния и трансионосферное зондирование. Необходимо сказать, что методы трансионосферного зондирования развиваются наиболее быстро в настоящее время, это связано с бурным развитием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Основной задачей настоящей работы является разработка алгоритмов обработки и интерпретации данных, полученных на сети ГНСС-станций, расположенных в Поволжском регионе, с целью построения двумерных карт ПЭС.

Для решения этой задачи разработан пакет прикладных программ, который позволяет обрабатывать большие массивы данных, представленные в формате RINEX, полученные с сети ГНСС станций. RINEX- международный формат текстового документа, находящегося в свободном доступе в сети INTERNET. Алгоритм определения ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям давно разработан и описан, например, в работах [1],[2]. Суть его заключается в следующем:

Наклонное ПЭС I_s — суммарная электронная плотность вдоль всей линии прямой видимости между приемником и спутником — может быть получена с помощью формулы:

$$I_s = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const_{1,2} + \sigma L], \quad (1)$$

где f_1 и f_2 — рабочие частоты, L_1 и L_2 — число оборотов фазы несущих на частотах f_1 и f_2 , λ_1 и λ_2 — длина волны несущих, $const_{1,2}$ — неоднозначность фазовых измерений, σL — ошибка фазовых измерений.

ПЭС рассчитывается вдоль луча «приемник-спутник», и ориентация этого луча в вычисляется по геоцентрическим координатам, определяемым, в свою очередь, по информации об эфемеридах НИСЗ, содержащейся в навигационном сообщении.

Нельзя привязать возмущения ПЭС к определенной высоте из-за его интегрального характера. Показано, что максимальный вклад вносит F2 слой ионосферы на высоте h_{mF2} (ионосферная точка), в зависимости от условий космической погоды высота h_{mF2} варьируется от 220 до 400 километров. Поэтому мы ограничиваемся построением двумерных карт ионосферных возмущений и не занимаемся определением трехмерных моделей неоднородностей. Также для построения карт мы проводим вычисления так называемых подионосферных точек, представляющих собой проекции ионосферных точек, о которых сказано выше, на поверхность земли. Расчет географической широты ϕ_p и географической долготы l_p подионосферной точки проводится по формулам:

$$\phi_p = \arcsin(\sin \phi_B \cdot \cos \psi_p + \sin \psi_p \cdot \cos \phi_B \cdot \cos \alpha_s), \quad (3)$$

$$l_p = l_B + \arcsin(\sin \psi_p \cdot \sin \alpha_s \cdot \sec \phi_p), \quad (4)$$

$$\psi_p = \frac{\pi}{2} - \theta_s - \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h_{mF2}} \cdot \cos \theta_s\right), \quad (5)$$

где ϕ_B и l_B — географические координаты точки наблюдения, могут быть получены из RINEX-файлов, ψ_p — центральный угол между точкой наблюдения и ионосферной точкой, R_E — радиус Земли, α_s и θ_s — азимут и угол навигационного искусственного спутника Земли. Соотношения (1)–(5) для нахождения подионосферной точки, наклонного и вертикального ПЭС взяты из [1].

Следующим шагом планируется ставить задачи параллельного вычисления массивов данных с большого числа станций, расположенных не только в Поволжском регионе, но и в других регионах России, поскольку это значительно увеличит быстродействие.

Таким образом, был разработан самостоятельный (независимый) комплекс оценки возмущений в ионосфере, влияния на нее различных факторов, имеющих антропогенный и естественный характер. Что может позволить уменьшить или предупредить негативное влияние на гражданскую и военную технику и средства связи, нежелательных возмущений.

Литература

1. Шерстюков Р.О. Анализ дневных среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по двумерным картам вариаций полного электронного содержания и ионограммам// Р.О. Шерстюков, А.Д. Акчурин.-Казань: Ученые записки казанского университета. Серия физико-математические науки, 2017.- С. 364–489.
2. T.Tsugawa, Y. Otsuka Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America// A.J. Coster, A. Saito.: Geophysical research letters.- 2007. –Vol. 34.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ИЗЛУЧЕНИЯ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Молодцов В.В.

МФТИ, факультет радиотехники и кибернетики, Москва, Россия

E-mail: molvlad@frtk.ru

В настоящее время огромной популярностью пользуются различные способы *беспроводной* передачи энергии. Выделим наиболее распространённые: метод электромагнитной индукции, магнитно-резонансный метод, метод передачи энергии с помощью радиоволн.

Целью данной работы является изучение механизмов, за счёт которых обеспечивается передача энергии, создание и экспериментальная проверка *единой модели*, описывающей вышеупомянутые методы, рассмотрение в её рамках принципа работы магнитных и спиральных антенн, а также природы возникновения *кратных резонансов* в трансформаторе Теслы.

В антенной технике огромное значение имеет задача об *излучении точечного диполя*: любую антенну можно разбить на множество таких диполей, чтобы найти результирующее излучение от всей антенны. Аналогично можно поступить и для анализа антенн в виде катушек индуктивностей или спиралей: представляем каждый виток антенны как точечный магнитный диполь, рассчитываем излучение от него, а затем находим результирующее поле. Именно в рамках такого представления и будут рассмотрены упомянутые выше способы беспроводной передачи энергии.

Первые два метода используют так называемое *ближнее* электромагнитное поле: расстояние от передатчика до приёмника меньше длины волны. В таком случае пренебрегают излучением, а элементы системы считают *сосредоточенными*: пренебрегают их размерами.

В основе метода электромагнитной индукции лежит закон Фарадея: изменение магнитного потока от одного контура порождает ЭДС индукции во втором контуре, в то время как магнитно-резонансный метод отличается тем, что цепь приёмника образует колебательный контур, настроенный на частоту передатчика, за счёт чего повышается КПД передачи энергии, что было экспериментально проверено в рамках работы.

Далее в работе рассмотрен принцип работы магнитной антенны, в основе работы которых также лежит закон электромагнитной индукции, однако магнитные антенны,

которые применяются в качестве принимающих, не оказывают влияния на передатчик, в отличие от *связанных* колебательных контуров, которые имеют место в магнитно-резонансном методе и в которых вторичный контур оказывает влияние на АЧХ первичного, что называется *расщеплением резонансов*.

Теперь перейдём к рассмотрению системы с распределёнными параметрами: в таком случае уже нельзя пренебрегать тем, что возмущение распространяется с конечной скоростью. Так, например, в *диполе Герца*, который представляет собой длинную линию со свободным концом, возникают *стоячие волны*, когда в длину отрезка укладывается нечётное число четвертей длин волн: отражённая волна складывается с падающей, из-за чего возникают узлы и пучности тока и напряжения.

Однако в ходе работы были также обнаружены кратные резонансы и в трансформаторе Тесла, из-за чего некорректно рассматривать его как систему с сосредоточенными параметрами, о чём говорится в статье [1]. Кроме того, согласно [2] АЧХ трансформатора Теслы отличается от АЧХ антенны, например, диполя Герца: из-за геометрии намотки имеет место *замедление фазовой скорости*, что характерно для *спиральных волноводов*, на базе которых построены, например, *спиральные антенны*, сравнение которых с трансформатором Тесла также входит в рамки данной работы.

В заключение рассмотрены также *антенны бегущей волны*, выявлены отличия от антенн стоячей волны в рамках составленной модели.

Литература

1. Kenneth L. Corum and James F. Corum, Ph.D - «Class Notes: Tesla Coils and the Failure of Lumped-Element Circuit Theory», 1999
2. Kenneth L. Corum and James F. Corum, Ph.D - «RF Coils, Helical Resonators and Voltage Magnification by Coherent Spatial Modes», 2001
3. Семёнов Н.А. - «Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов.» - М., «Связь», 1973
4. Сивухин Д.В. - «Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. 3. Электричество.» - 5-е изд., стер. - М.: ФИЗМАЛИТ, 2006. - 656 с. - ISBN 5-9221-0673-2.
5. Озерский Ю.П. - «Радиотехнические цепи и сигналы. Учебное пособие.» - М.МФТИ, 2007. - 176 с ISBN 5-7417-0165-6

УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ АКТИВНЫХ ПОМЕХ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Мороз А.В.¹, Маланин К.Ю.², Краснов А.А.², Рудь В.Ю.¹

¹С-Пб ПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²АО «Заслон», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: moroz.com3844@gmail.com

В современном мире происходит стремительное увеличение загруженности частотных диапазонов работы радиолокационных станций (РЛС). Вводятся в эксплуатацию новые станции, увеличивается число подвижных объектов и т.д. Особенно перегруженным как излучаемыми и отраженными сигналами, так и помехами оказался X диапазон (от 8 до 12 ГГц). Поэтому задачи модернизации находящихся в эксплуатации или разработка новых устройств защиты РЛС от помех являются крайне актуальными.

Наиболее чувствительными к таким помехам различного рода по ряду причин являются РЛС морского (большая часть) и воздушного базирования. Это создает ряд особенностей при разработке устройств для компенсации помех.

В отличие от мощных РЛС наземного базирования в этих РЛС необходимо учитывать влияние на работу аппаратуры как пассивных, так и активных помех, а также шумов [1, 2]. Активные помехи создаются специальными приёмо-передающими или пере-

дающими радиоустройствами — станциями или передатчиками радиопомех, пассивные — различными искусственными отражателями радиоволн. К пассивным помехам относятся также отражения радиоволн от местных предметов и природных образований, мешающие работе РЛС, для их компенсации разработаны и успешно применяются ЧПК (череспериодные компенсаторы), поскольку эти помехи не являются периодическими.

На данные РЛС очень часто оказывается воздействие мощным излучением постановщиков помех наземного или морского базирования, при этом они стремятся настроиться на частоты излучения станции. В результате такого воздействия на индикаторах РЛС создается шумовой фон, в котором исчезает полезный сигнал, и появляются ложные отметки целей, что в значительной степени осложняет обнаружение целей, целе-распределение (если сопровождается несколько объектов) и сопровождение их [1, 2]. Воздействуя на устройства автоматического обнаружения и сопровождения объектов по азимуту и углу места, скорости и дальности, помехи могут вызывать перегрузку устройств автоматической обработки данных, срыв автоматического сопровождения объектов, вносить большие ошибки в определение местоположения и параметров движения объектов.

Радиолокационным станциям с активными фазированными антенными решетками (АФАР), работающим в режиме обзора, могут быть созданы непрерывные активные шумовые помехи (АШП), которые являются наиболее универсальными. При воздействии этой помехой на РЛС в устройствах обработки происходит «подавление» полезного сигнала, что затрудняет оператору обнаружение цели, а в автоматизированных системах нарушает работу вычислительных средств [1].

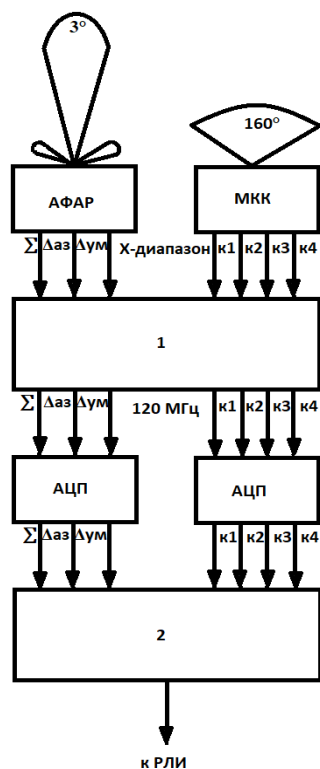


Рис. 1. Структурная схема разработанного нами модуля с АФАР для компенсации активной помехи, где 1 — супергетеродинный приемник с преобразованием частоты, 2 — устройство компенсации помех с цифровой обработкой сигнала; Σ — суммарный канал, Δ аз — азимут, Δ ум — угол места

Нами предложен способ с использованием компенсационной антенны, который позволяет осуществить защиту устройства обработки сигнала РЛС от этой активной помехи, направление которой не совпадает с направлением цели. В состав РЛС добавляется малогабаритная компенсационная антенна, диаграмма направленности которой перекрывает диапазон углов обзора АФАР. Это позволяет с учетом корреляции между основным и компенсационным каналами осуществить вычитание сигнала компенсационного канала из основного. На рис. 1 представлена структурная схема разработанного нами модуля с АФАР для компенсации активной помехи.

Экспериментальная проверка предложенного нами способа была проведена с помощью широкополосного модуля компенсации помех (МКП) X-диапазона с суммарной зоной ответственности 160° в азимутальной плоскости. Было установлено, что наиболее целесообразно в качестве компенсационной антенны использовать несколько рупорных антенн с перекрывающимися диаграммами направленности, имеющих достаточно предсказуемую диаграмму направленности и относительно небольшое взаимное влияние отдельных рупоров.

Полученные результаты экспериментов показали, что наилучшая компенсация помех осуществляется при использовании компенсационной антенны, состоящая из 4 рупоров, зона ответственности каждого из них равна 40° . Анализ полученных экспериментальных диаграмм направленности показал, что спроектированный широкополосный модуль компенсации помех на основе рупорной антенны может успешно эксплуатироваться в составе радиолокационных станций средней мощности с АФАР.

Литература

1. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках / М.: Радиотехника. 2010.
2. Lenets V.A., Tarasenko M.Yu., Davydov V.V., Rodygina N.S., Moroz A.V. New method for testing of antenna phased array in X frequency range.// Journal of Physics: Conference Series. 2018, Vol. 1038 (1) 012037.

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ГИБКИХ НАНОМЕТРОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Морозов С.И., Иванов Р.А., Фитаев И.Ш.

КФУ им. В.И. Вернадского, Физико-техн. институт, Симферополь, Россия

E-mail: avalcon5@mail.ru

Стремительное развитие современного мира все больше направляет нас к миниатюризации и дальнейшему переходу на толщины, соизмеримые с единицами нанометров, однако эти изменения сопровождаются рядом трудностей, обусловленных проблематикой неполноты теоретических знаний об эффектах, происходящих на столь малых величинах. С уменьшением размера электрических компонентов и самих устройств необходимо учитывать все большее количество как внешних, так и внутренних факторов, влияющих на работоспособность системы в целом [1,2]. В связи с этим очень важно понимание процессов, происходящих в электронных устройствах, на толщинах нанометрового диапазона.

Таким образом целью наших исследований является изучение структуры тонкопленочных проводящих материалов и процессов, возникающих при воздействии на них СВЧ-излучения [3]. В качестве исследуемых образцов использовались пленки, полученные методом магнетронного напыления алюминия на гибкие диэлектрические подложки из полиэтилентерефталата (лавсан) и фторопласта.

На рисунках приведены фотографии образцов МДС на подложках из лавсана и фторопласта под микроскопом, после воздействия на них СВЧ-излучения мощностью 600 Ватт в течение определенного времени. На первом рисунке образец с подложкой из лавсана и напылением алюминия толщиной примерно двадцать нанометров, подверженный излучению длительностью в одну секунду. Отчетливо видна множественная деградация структуры параллельно движению токов.

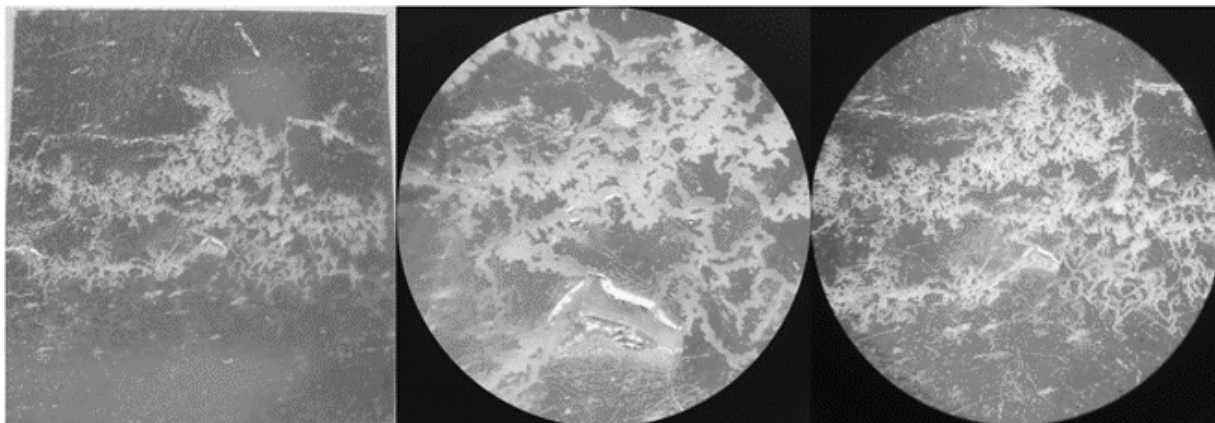


Рис. 1. Алюминиевая пленка толщиной 20 нанометров на подложке из лавсана

На втором рисунке образец с подложкой из лавсана и напылением алюминия толщиной примерно десять нанометров, подверженный излучению длительностью в две секунды. Большая длительность облучения привела к обширному тепловому разрушению пленки.

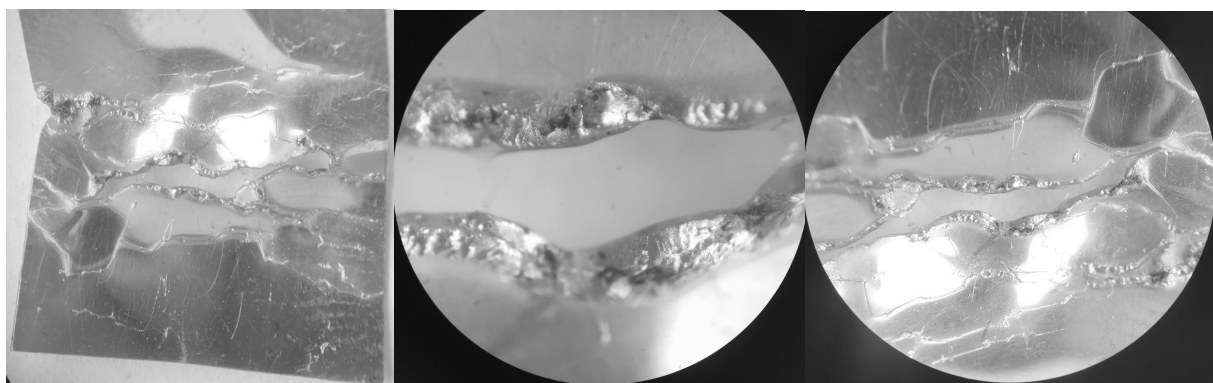


Рис. 2. Алюминиевая пленка толщиной 10 нанометров на подложке из лавсана

На третьем рисунке образец с подложкой из фторопласта и напылением алюминия толщиной примерно 30 нанометров, подверженный излучению длительностью в одну секунду. Заметны характерные пробои структуры вдоль всего образца.

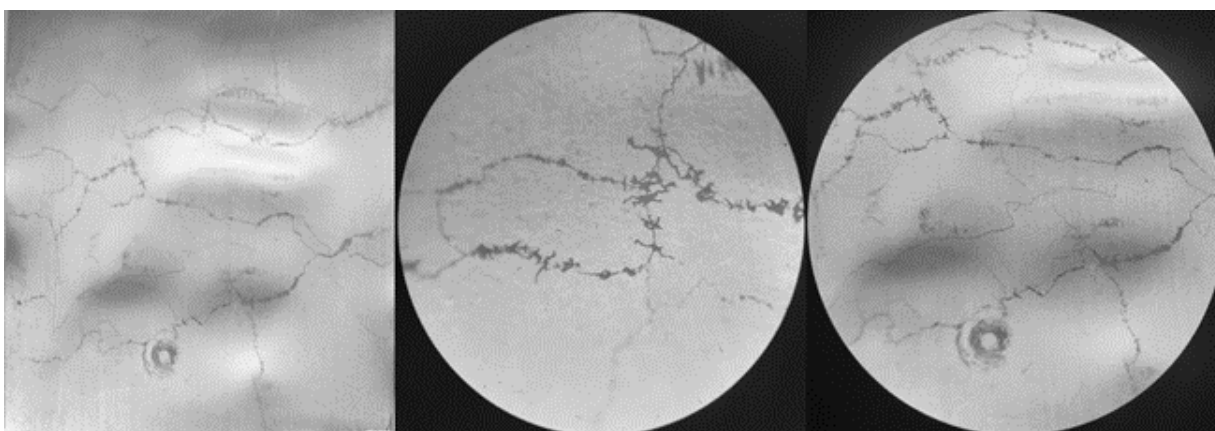


Рис. 3. Алюминиевая пленка толщиной 30 нанометров на подложке из фторопласта

Изучив полученные образцы можно прийти к выводу, что в тонкопленочных структурах под кратковременным воздействием СВЧ-излучения происходит механическая деформация осажденной атомарной структуры на диэлектрической подложке вдоль

движения токов за счет частичного поглощения энергии и как следствие теплового разрушения целостности материала.

Литература

1. Thin Solid Films / I. H. Kazi [et al.] – 2003. Vol. 433. P. 337–343
2. Wong K. L. Effects of electromagnetic interference for electromagnetic pulses incident on microstrip circuits / K. L. Wong // IEEE Proceedings. – 1990. – Vol.137, № 1. – P. 75–77.
3. Арсеничев С.П. Дифракция электромагнитного излучения на тонких проводящих пленках металлодиэлектрических структур в прямоугольном волноводе / С.П. Арсеничев [и др.]// Электромагнитные волны и электронные системы. - 2017 г., т. 22, № 2. С. 48–53.

АНТЕННЫЕ УСТРОЙСТВА СВЧ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЗАГОРИЗОНТНОГО РАДИОМОНИТОРИНГА

Никитина М.И.

*С-Пб ПУ Петра Великого, институт физики нанотехнологий и
телекоммуникаций, С-Пб, Россия
E-mail: nikma1108@mail.ru*

В представленном докладе сформулированы особенности распространения радиоволн УКВ и СВЧ диапазона в тропосфере. Также на основании литературных данных представлены особенности распространения радиоволн за счет рассеяния на неоднородностях в данном слое атмосферы.

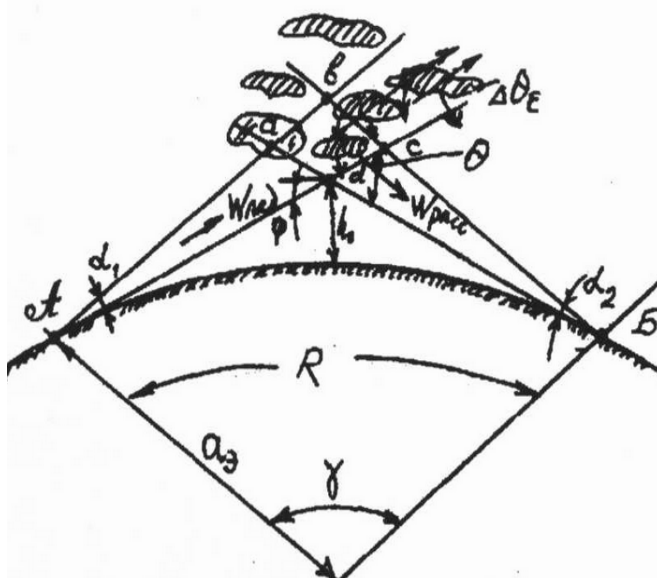


Рис. 1. Дальнее рассеяние за счет неоднородностей в тропосферном слое

Возможны три типа волноводных каналов, образующихся над морской поверхностью и в прибрежных районах, в зависимости от климатических и погодных факторов. Существование волноводов обусловлено наличием сверхрефракции в нижних слоях тропосферы. В представленном докладе обоснована необходимость использования метеорологических данных, полученных как в результате долговременных наблюдений (информация взята из специализированных атласов), так и наблюдений, производимых в реальном времени, для оценки вероятности существования волноводных каналов в открытом море и вблизи берега.



Рис. 2. Виды рефракции в тропосфере. 1 – отрицательная, 2 – отсутствие рефракции, 3 – нормальная, 4 – критическая, 5 – сверхрефракция

Приведены характеристики тропосферных волноводов, основанные на результатах измерений, проведенных в Тихом океане, а также в Охотском и Черном морях. Сделан вывод о возможности построения систем радиомониторинга, использующих тропосферное волноводное распространение – подобные системы могут быть установлены на кораблях и на прибрежных станциях. В докладе также сделана оценка необходимых характеристик антенных устройств, предназначенных для работы в системах радиомониторинга, использующих тропосферный канал распространения радиоволн.

Представлены несколько возможных вариантов антенных устройств. В качестве примеров рассмотрены многолучевые цилиндрические и сферические линзы Люнеберга, а также линейные антенные решетки с диаграммообразующими устройствами на основе линз Ротмана. Их изображения приведены на рис. 3 и рис. 4. Коэффициенты усиления описанных антенн в сантиметровом диапазоне частот около 20 дБ.



Рис. 3 Цилиндрическая линза Люнеберга на подложке.

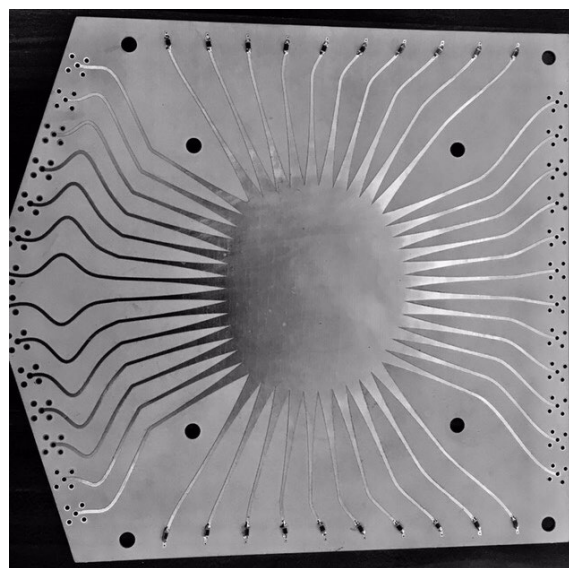


Рис. 4 Линза Ротмана

На основе выполненной работы представляется нецелесообразным использовать для радиомониторинга эффект тропосферного рассеивания на неоднородностях, поскольку это требует использования больших антенн с коэффициентом усиления больше 35 дБ, даже для обнаружения сигналов очень мощных локаторов. При этом перспективно использование волноводного распространения, поскольку в морских и прибрежных условиях этот канал существует хотя и не постоянно, но достаточно часто и позволяет существенно (не менее чем в 3 раза) увеличить зону мониторинга.

Литература

1. A.G.Stove, 1st EMRS DTC Technical Conference – Edinburgh 2004.
2. Суриков В.В., Павлов Н.А., Тюрин А.М. Многолучевые антенные решетки для систем радиотехнического мониторинга. Нелинейный мир, 2014 г., № 5, стр 45–53.
3. Рязанцев Р.О., Саломатов Ю.П., Сугак М.И., Павлов Н.А., Синицин М.Е. Многолучевая широкополосная антенная система на основе линзы Люнеберга. Нелинейный мир, № 5, Т. 12, 2014, с. 37–44.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТОКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ПРОЛЁТНЫХ КАНАЛАХ
ВАКУУМНЫХ УСТРОЙСТВ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Овсянников Н.Е.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия**e-mail: buntinghartmann@gmail.com*

Отсутствие мощных эффективных и компактных источников излучения является главным препятствием в освоении субтерагерцового диапазона (0,1–1 ТГц). Поэтому создание компактных усилителей и генераторов с мощностями порядка единиц–тысяч ватт является основной задачей при продвижении в субтерагерцовый диапазон. Наиболее перспективными компактными приборами для получения мощного субтерагерцового излучения в настоящее время являются электровакуумные микроволновые приборы. Выходная мощность таких приборов зависит от мощности электронного потока и эффективности ее преобразования в электромагнитную. Поскольку требование компактности приборов ограничивает величину используемого ускоряющего напряжения, то основным способом увеличения мощности электронного потока является увеличение его силы тока.

С другой стороны, для эффективного взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями многозачерных резонаторов и замедляющих систем электровакуумных микроволновых приборов радиус пролетного канала должен быть меньше четверти рабочей длины волны. Поэтому, для получения высоких значений рабочих токов из-за малых размеров сечения пролетного канала в субтерагерцовом диапазоне частот, необходимо переходить к использованию электронных потоков с высокими значениями плотности тока в пучке (более 1000 А/см^2) [1]. При этом возникает вопрос о том, какова величина предельного тока электронного потока, который можно провести без потерь через пролетный канал электровакуумного прибора субтерагерцового диапазона частот. Для сплошных аксиально-симметричных электронных пучков существует достаточно точное аналитическое решение задачи нахождения предельных значений тока и провисания потенциала [2]. Однако для кольцевых электронных пучков такое решение отсутствует.

В работе, предложена эффективная численная модель, основанная на решении краевой задачи для нелинейного уравнения Пуассона, позволяющая с высокой точностью оценить предельный вакуумный ток и другие параметры круглых и кольцевых электронных пучков в цилиндрических пролетных каналах. В первой части работы представлены постановка задачи и описание численной модели расчета предельного вакуумного тока, а также сравнение с уже имеющимися аналитическими формулами. Во второй части работы приведены результаты исследования параметров сплошных и кольцевых аксиально-симметричных электронных пучков — значения предельных токов, их плотностей и провисания потенциала.

Литература

1. Anurag Srivastava. Microfabricated Terahertz Vacuum Electron Devices: Technology, Capabilities and Performance Overview. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2015, 2(8): pp. 54–64.
2. J.R. Thompson and M.L. Sloan, in the Proceedings of 2nd International Topical Conference on High Electron and Ion Beam Research and Technology (Cornell University, New York. 1977). Vol. II. p. 729.

ОСЦИЛЛЯТОРЫ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ С ВЫРАЖЕННОЙ МАГНИТОУПРУГОЙ СВЯЗЬ

Попов П.А.

МФТИ (ГУ), Физтех-школа электроники, фотоники и молекулярной физики,

Долгопрудный, Россия

E-mail: paavali.popov@gmail.com

На текущий момент отсутствие компактных и надёжных генераторов и приёмников когерентных сигналов в диапазоне частот 0,1 – 10 ТГц является одной из фундаментальных проблем физики [1]. Существующие на данный день методы генерации сигналов в данном частотном диапазоне требуют комплексных установок для поддержания условий их работы, что ограничивает их широкое применение. Одним из возможных решений данной проблемы являются устройства спинтроники, высокие частоты генерации в которых достижимы за счёт магнитных свойств используемых материалов, в частности антиферромагнетиков (AFM) [2].

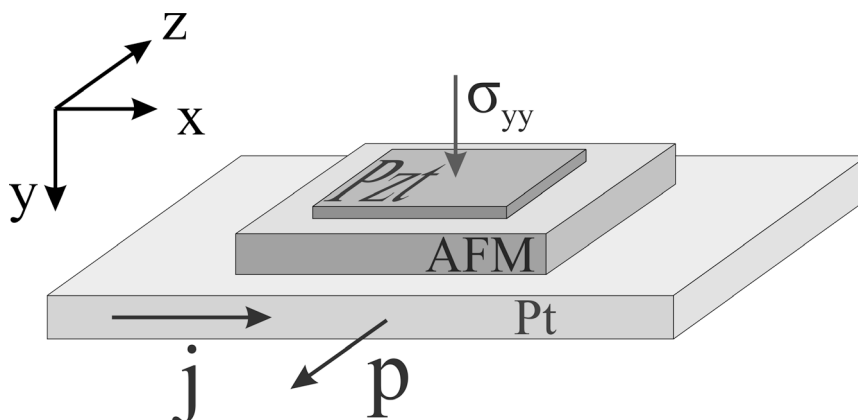


Рис. 1. Рассматриваемая трёхслойная структура — подложка из платины(Pt), слой антиферромагнетика с анизотропией в лёгкой плоскости и пластинка пьезоэлектрика(Pzt).

В данной работе нами было изучено влияние магнитоупругих свойств антиферромагнетика на колебательные процессы и параметры генерации в слоистой структуре из подложки тяжёлого металла, слоя AFM и пластинки пьезоэлектрика (рис. 1). Было теоретически исследовано влияние равновесных и внешних деформаций на динамику намагниченности подрешёток AFM, выведены и решены соответствующие уравнения. Было установлена возможность реализации двух различных режимов колебаний: затухающих колебаний и автоосцилляций; разобраны их отличительные особенности и зависимость от внешних сил; найдены методы управления генерацией с помощью внешних сил.

В данной работе были исследованы колебания в системе тяжёлый металл-антиферромагнетик-пьезоэлектрик в присутствии внешних напряжений. Полученные зависимости параметров и режимов колебаний от внешних указывают на возможность использования описанных в работе методик управления колебаниями для тонкой настройки осцилляторов. Работа поддержана РФФИ (18-37-20048 мол_а_вед и 18-29-27018 мк, 18-07-00509 А) и Правительством Российской Федерации (соглашение № 074-02-2018-286) в рамках лаборатории “Терагерцовая спинтроника” Московского физико-технического института (государственного университета).

Литература

1. Kleiner R. Filling the Terahertz Gap // Science. — 2007.
2. R. Khymyn et al. Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current // Scientific Reports. — 2017.

СОВРЕМЕННЫЕ АНТЕННЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМЕ РАДИОМОНИТОРИНГА

Синицына Е.А.

*С-Пб ПУ Петра Великого, институт физики нанотехнологий и
телекоммуникаций, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: katsin3365@gmail.com*

В докладе представлены результаты работы по составлению каталога антенных устройств СВЧ диапазона, которые могут быть использованы в комплексах радиомониторинга. Рассмотрим широкополосные антенны ($\frac{f_{max}}{f_{min}} > 2$). Такие антенны используются в системах радиомониторинга, предназначенных для наблюдения и пеленгования источников радиоизлучения (локаторов, за исключением LPI локаторов).

Возможность использования антенн с малым коэффициентом усиления для пеленгования локаторов связана с тем, что плотность потока энергии на раскрыве антенны системы радиомониторинга пропорциональна $\frac{1}{r^2}$, а плотность потока энергии на раскрыве локатора пропорциональна $\frac{1}{r^4}$.

В докладе рассмотрены следующие типы антенн, применяемых в системе радиомониторинга:

1. Спиральные антенны
2. Синусные антенны
3. Рупорные антенны

Рассмотрим каждый из этих типов.

Спиральные.

Типичная плоская спиральная антенна приведена на рис. 1.



Рис. 3 Спиральная антенна



Рис. 4 Синусная антенна



Рис. 5 Рупорные антенны

Что касается спиральных антенн, то из названия понятно, что они в форме винтовой линии. Антенны этого типа являются самыми популярными в радиопеленгации, благодаря своей постоянной ширине полосы пропускания и своей круговой поляризацией. Проще понять эту антенну как набор дипольных антенн определенной длины, которые начинаются с самой высокой резонансной частоты и заканчивается самой низкой. Существуют такие типы спиральных антенн как спираль Архимеда, логарифмическая спираль и коническая спираль. Свойства логарифмических спиралей зависит только от углов, а не от размеров. Рабочая полоса частот определяется с нижней стороны ее размером (длина последнего витка соизмерим с максимальной длиной волны), а с верхней размером узла возбуждения.

Синусная антенна широко используется в системах радиомониторинга благодаря более высокому коэффициенту усиления, чем у спиральной, а также возможности приема электромагнитных волн двух ортогональных линейных поляризаций. Более подробно о том, где используются такие антенны, будет разобрано в докладе.

На рис. 2 представлена синусная антенна (2 до 18 ГГц).

Рупорная.

В системах радиомониторинга рупорные антенны должны обладать следующими характеристиками: относительная ширина рабочего диапазона частот больше 2, стабильная ширина диаграммы направленности в рабочем диапазоне, желательно, чтобы рупорная антенна принимала электромагнитные волны двух ортогональных линейных поляризаций. Этим требованиям удовлетворяют рупорные антенны с изломом образующей и узлом возбуждения специальной конструкции. Для рупорных антенн существует три основных типа: Е-секториальные, Н-секториальные и пирамидальная

В дальнейшем, мы разберем принцип работы, характеристики и применение этих антенн

Литература

1. Stephen E. Lipsky Microwave passive direction finding. SciTech Publishing, 2004.
2. Рамзей В. Частотно-независимые антенны. М.: Мир. 1968

УПРАВЛЕНИЕ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ С УДАЛЕННЫМ ОБЪЕКТОМ

Стрельник А. И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

e-mail: stalexig@mail.ru

Для связи с космическими объектами в основном используется ультракороткие волны. Если канал требует высокой информационной насыщенности, необходимо переходить на более высокие частоты. Для обеспечения эффективной связи на этих частотах требуются антенны с узкой диаграммой направленности (ДН). Обычно в этом случае используются антенны рефлекторного типа. Однако наряду со всеми преимуществами такие антенны имеют ряд недостатков, в частности, требуют наличия опорно-поворотных устройств и защиты антенного поста от атмосферных воздействий, что влечет за собой увеличение масс-габаритных показателей, а также появление дополнительных каналов управления электромеханической системой.

Альтернативным способом решения данной задачи можно рассматривать фазированную антенную решетку (ФАР). ФАР — сложная антенна, состоящая из совокупности излучающих элементов, направление излучения и форма соответствующей ДН которой регулируются изменением амплитудно-фазового распределения токов или полей возбуждения на излучающих элементах. Такой тип антенны позволяет формировать необходимую ДН без использования электромеханических опорно-поворотных устройств, что гораздо более оправдано если объект перемещается. В этом случае возможны два варианта решения:

- пассивная ФАР, когда каждый из излучающих элементов не содержит в себе источников электромагнитного излучения;
- активная ФАР — когда каждый из излучающих элементов содержит приемопередающий модуль.

В системах подвижной радиосвязи существует проблема сохранения ориентации антенны на космический аппарат при перемещениях подвижного объекта (автомобиль, корабль, самолет), на котором она установлена. В настоящей работе рассматривается

система, которая позволяет изменять положение ДН ФАР в зависимости от ориентации в пространстве приёмно-передающего комплекса.

Структура системы:

- Устройство инерциальной навигации;
- Приемник спутниковой навигационной системы;
- Следящая система;
- Устройство для определения положения антенного поста в пространстве;
- Блок управления.

Основная цель работы заключается в разработке блока управления, который будет наводить ДН ФАР на удаленный объект в соответствии с ориентацией в пространстве приёмно-передающего комплекса.

Литература

1. Понамарев Ю.А. Инерциальные модули компании Xsens: объединение последних достижений науки в миниатюрном формате // Компоненты и технологии – 2017 - №7;
2. В.А. Борсоев, А. В. Гребенников, А. С. Десятов. Комплексирование угломерной спутниковой навигационной системы Глонасс/GPS с ИНС на воздушных судах // Научный вестник МГТУ ГА, серия Радиофизика и радиотехника – 2009 - №139;
3. А.Л. Асеев, В.М. Владимиров, Ю. Л. Фатеев, А. И. Филиппов, В. Ф. Шабанов, В. Н. Шепов. Точность угломерных измерений по сигналам Глонасс/GPS // Исследования наукограда – 2013 - №3-4;
4. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание // М.: Издательский дом «Вильямс» - 2008;
5. Paul D. Groves. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems // Artech house – 2009;
6. IEEE Standard for inertial systems terminology, IEEE Std 1559–2009, 2009;

ВОЛНОВЫЕ АНАЛОГИ СРЕД НА ОСНОВЕ СХЕМ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Судеев Б.П.

МЭИ, радиотехнический факультет, Москва, Россия

E-mail: bsudeev@mail.ru

В данной работе рассматриваются возможности создания устройства переменной задержки радиосигналов на базе каскадно-включенных колец системы фазовой автоподстройки частоты.

Системы фазовой синхронизации (СФС) широко применяются в различных устройствах формирования и обработки радиосигналов с угловой модуляцией [1,2]. Типовая СФС представляет собой обычно одномерную систему фазового управления с одной входной и одной выходной координатами (рис.1а). Текущие фазы $\varphi_{in}(t)$ и $\varphi_{out}(t)$ колебаний подстраиваемого генератора (ПГ) и входного сигнала сравниваются между собой в фазовом дискриминаторе (ФД), а цепь управления (ЦУ) с операторным коэффициентом передачи $K(p)$ (оператора $p \equiv \frac{d}{dt}$) служит для придания системе необходимых динамических свойств.

Для практических приложений главное достоинство СФС перед способом непосредственного захватывания автогенератора внешним сигналом состоит в наличии цепи управления, позволяющей превратить напряжение ошибки $e(t)$ в любой желаемый сигнал управления $g(t)$ (рис. 1а).

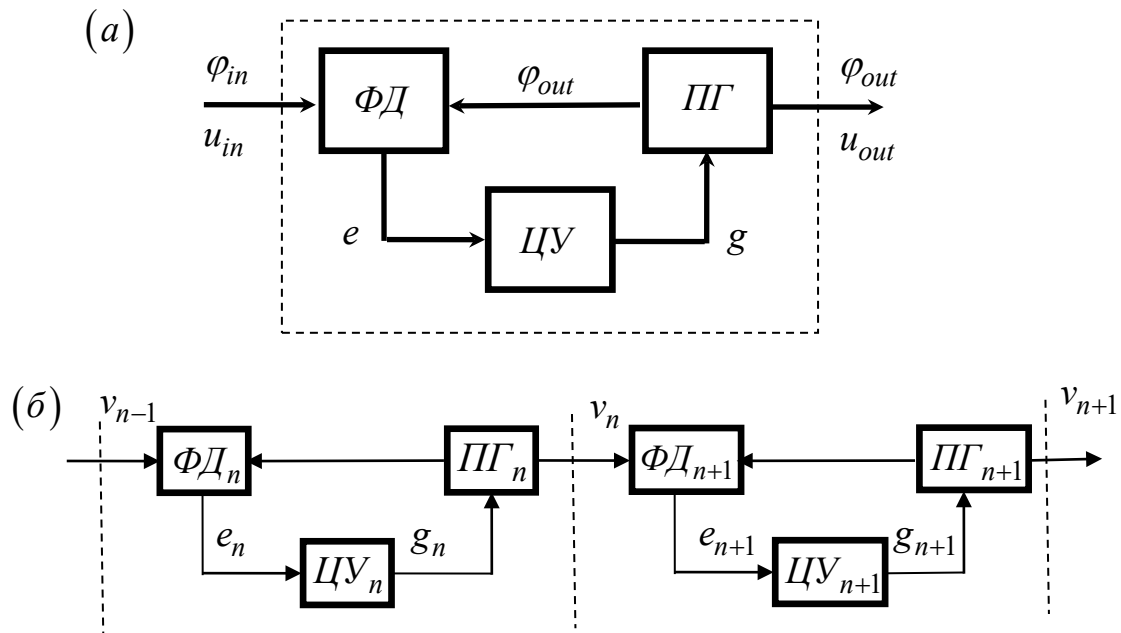


Рис.1. Структурные схемы одномерной (а) и многомерной (б) СФС.

Однако простейшим СФС, построенным по одноконтурной схеме типа рис.1а, притуплены противоречия при попытке удовлетворить различным требованиям к характеристикам системы — большой полосе захвата, малой вероятности срыва слежения, высокому быстродействию, малой шумовой полосе и т.д. [1,2]. Среди многих предлагавшихся в литературе [1–5] путей ослабления указанных противоречий наиболее перспективным, на мой взгляд, является целенаправленный переход к коллективному фазовому управлению ансамблем многих подстраиваемых автогенераторов. Такое управление использует общие, повторяющиеся свойства отдельных ПГ и позволяет устранить некоторые из перечисленных ограничений, свойственных одноконтурным СФС.

Результатом работы является теоретико-волновой подход к коллективу взаимодействующих СФС, позволяющий отыскивать такие волновые его аналоги, которые характеризовали бы коллективную СФС не как дискретный ансамбль, а как сплошную (распределенную) среду.

Центральное выражение работы, описывающее распространение процесса возмущения фазы колебаний $v(t)$ подстраиваемых автогенераторов вдоль цепочки парциальных систем, и позволяющее построить «волновой аналог» однонаправленной (без цепей взаимного управления) каскадной структуры СФС:

$$[K(p, n) + \tau(n)p] \frac{\partial^2 v(t, n)}{\partial n^2} + t(n)p \frac{\partial v(t, n)}{\partial n} = 0$$

Это уравнение справедливо и для неоднородной по координате n структуры цепочечной СФС.

Отметим, что полезность волновых аналогов каскадных СФС для построения практических устройств состоит в возможности целенаправленного подбора типа оператора $K(p)$ и значения постоянной времени t парциальной СФС для достижения желаемого вида дифференциального уравнения. Это уравнение характеризует каскадную СФС как сплошную среду, в качестве устройства переменной задержки для радиосигналов с угловой модуляцией, а его вид определяет характеристики такой среды.

В работе найдены не только волновые аналоги каскадного СФС, не содержащего цепей взаимного управления, но и решения уравнений волновых аналогов.

Литература

1. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении. Пер. с англ. /Под ред. Ю.Н. Бакаева, М.В. Капранова. М.: Сов. Радио, 1978.
2. Акимов В.Н. и др. Системы фазовой синхронизации. Под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной. М.: Радио и связь, 1982.
3. Капранов М.В. Каскадные системы фазовой автоподстройки частоты. Динамика систем. 1976. Вып. 11. С. 76–85.
4. Капранов М.В. Системы коллективной фазовой автоподстройки частоты. Труды МЭИ. 1978. Вып. 355. С. 3–9.
5. Капранов М.В. Коллективная синхронизация в каскадных взаимосвязанных системах ФАП. Труды МЭИ. 1979. Вып. 418. С. 3–8.

ОСОБЕННОСТИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Тадевосян С.Р.

Российско-Армянский универс., Инж.-физич. институт, Ереван, Армения

E-mail: tad.sus.94@gmail.com

Востребованность мобильной связи в различных сферах деятельности требует дальнейшего развития беспроводных технологий — от новых стандартов, таких как 802.11ax и Wi-Gig, до 5G[1]. В первую очередь это связано с увеличением числа пользователей и требованием повышения скорости передачи. Уже это традиционное требование ставит перед разработчиками сложные технические проблемы. Теснота в эфире требует освоения новых, причём высокочастотных радиодиапазонов, учитывая повышение скорости передачи. При этом, сильное затухание волн миллиметрового диапазона требует повышения мощности передатчиков, что неприемлемо как с технической, так и экономической точек зрения. Поэтому резко встал вопрос разработки прогрессивных технологий передачи сигналов, в частности, внедрения новых методов модуляции и принципов пространственной селекции. В целом, сетевые провайдеры и мобильные операторы оценивают примерно в 10 000 раз больше трафика, срока автономной службы батареи до 10 лет и задержки менее 1 мс.

В своем последнем выпуске МСЭ обновил список частот для мобильной связи. На Рис.1 представлен спектр поглощения радиоволн при распространении в свободном пространстве. Как видно из рисунка, атмосферное поглощение ограничивает использование некоторых полос (пики поглощения). Сочетание правил МСЭ и практических измерений поглощения отражает следующие полосы для сетей следующего поколения: 25,25–29,5 ГГц, 37–40 ГГц и 66–76 ГГц. Однако даже в рекомендуемых диапазонах есть основные и второстепенные спецификации, которые необходимо учитывать.

На рис. 2 показаны потери свободного распространения, рассчитанные для разных частот и на разных расстояниях: от 850 МГц до 76 ГГц и от 10 м до 10 км. Фактически некоторые из частот, для которых рассчитывается потеря свободного распространения, находятся в существующих спецификациях некоторых стандартов. Остальные частоты, такие как 38 ГГц или 76 ГГц, являются частотами кандидатов для сети следующего поколения. Сравнивая потери для 850 МГц и 76 ГГц, мы видим, что разница составляет почти 40 дБ, т.е. в 10 000 раз. Очевидно, что повышение мощности не может являться решением данной проблемы.

Первый шаг к решению данного вопроса состоит в уменьшении размеров сот и тем самым в сокращении расстояния между базовыми станциями. Однако этого не достаточно. Здесь требуется применение таких технологий, как Массив ММО [1], направленные антенны [1], спектрально-эффективные сигналы [2] и другие способы, оптимизирующие соотношение между мощностью, шириной полосы и помехоустойчивостью сигнала. Только совместные меры могут дать требуемую энергетическую эффективность.

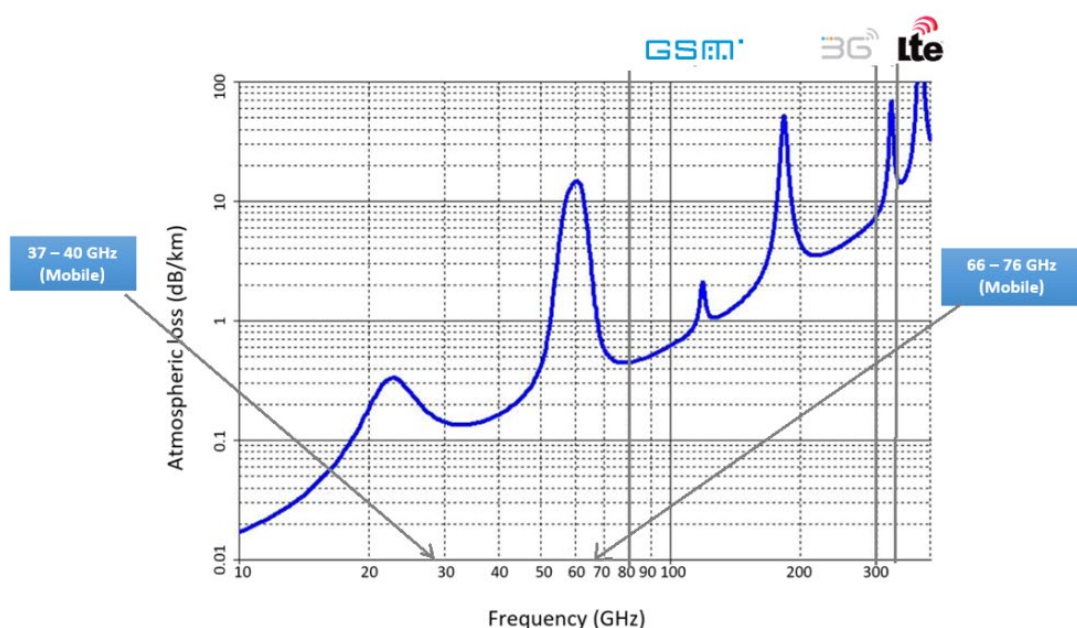
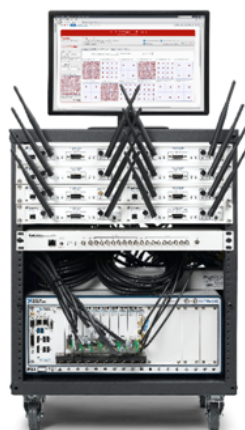


Рис.1. Спектр потерь при распространении радиоволн в свободном пространстве

	850MHz	2.4GHz	3.6GHz	28GHz	38GHz	60GHz	76GHz
10m	51.03	60.04	63.57	81.38	84.04	88.0	90.06
100m	71.03	80.04	83.57	~40dB	104.04	108.0	110.06
500m	85.01	94.02	97.55	10,000x	118.02	121.98	124.04
1km	91.03	100.04	103.57	121.38	124.04	128.0	130.06
10km	111.03	120.04	123.57	141.38	144.04	148.0	150.06

Рис. 2. Потери в свободном пространстве

Мобильные сети первого поколения и последующие поколения используют многоканальные и МIMO-варианты антенн. Сегодня прототипы Массив МIMO используют 128 каналов и более. Хотя еще точно нельзя сказать, сколько антенн будет задействовано в системах 5G в будущем, но наиболее вероятным является использование 64 и 128 антенн [3]. Рассмотренные технологии оказывают наибольшее влияние на радиооборудование будущих беспроводных систем [1].



Возможности

- 4-128 антенн
- 50 МГц – 6 ГГц
- Полоса 20 МГц
- Двухнаправленная связь в реальном времени
- До 12-и абонентов одновременно
- Возможность работы с многоантенными абонентами

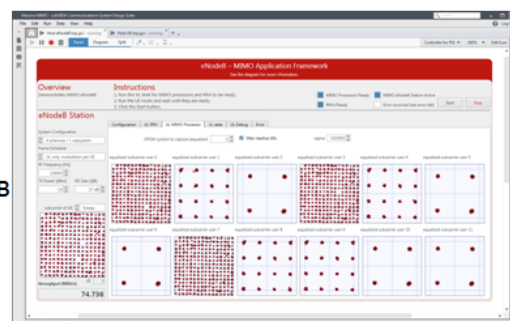


Рис. 3. Прототип системы Массив МIMO

Прототипы технологий Массив МIMO и mmWave (Рис.3) были разработаны и изготовлены в Армении и были представлены на выставке DigiTecExpo 2017-2018 гг.[4]

Литература

1. http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/2005-ran_r16_schedule
2. <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/#ref2>
3. <http://anel.am/5g-mimo>
4. <https://www.digitec.am/gallery>

**ОБНАРУЖЕНИЕ КОГЕРЕНТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ КВАЗИРАДИОСИГНАЛОВ
С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ФОНЕ ШУМА**

Титов К.Д.

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

E-mail: titovkd@bk.ru

Последовательности различного рода импульсов находят широкое применение в статистической радиотехнике, радиолокации, связи. Большое число практических задач требует обнаружения последовательности импульсов на фоне случайных искажений [3,7,8]. В книгах [7,8], ставших уже классическими, описаны алгоритмы обнаружения последовательности узкополосных радиоимпульсов с неизвестными амплитудами и начальными фазами. В работе [3] исследованы алгоритмы обнаружения последовательности сверхширокополосных (СШП) импульсов. Среди множества СШП сигналов выделяют отдельный класс – СШП квазирadiосигналы (КРС) [6], структура которых подобна узкополосным радиосигналам, но условие относительной узкополосности для них не выполняется. Известные результаты по решению задач обнаружения или оценки параметров последовательности узкополосных радиоимпульсов не могут быть использованы применительно к СШП КРС, поскольку при получении известных результатов существенно используется условие относительной узкополосности. Для сигналов такого вида неприменимы как традиционные методы генерации, излучения, приёма и обработки сигналов, так и соответствующие технические средства обработки, основанные на преобразовании Фурье, использующие резонансные свойства элементов и устройств. Вопросам оптимального и квазиоптимального обнаружения одиночных КРС посвящён ряд работ [1,4-6]. В [6] выполнен синтез и анализ максимально правдоподобного алгоритма обнаружения СШП КРС с произвольной формой модулирующей функции, в [1,4,5] – ряда алгоритмов обнаружения СШП КРС с неизвестной длительностью. Целью данной работы является исследование алгоритмов обнаружения последовательности СШП КРС с произвольной формой модулирующей функции и неизвестными амплитудой и начальной фазой.

Большинство радиофизических систем являются узкополосными и используют в качестве несущего колебания для передачи информации гармонические сигналы. Узкополосность оказывает влияние на эффективность функционирования радиофизических систем, поскольку количество информации, передаваемой в единицу времени, прямо пропорционально используемой полосе частот. Использование последовательности СШП КРС с различными видами модуляции в системах радиосвязи и передачи данных позволит повысить скорость передачи информации на несколько порядков по сравнению с существующими технологиями как узкополосного, так и широкополосного беспроводного доступа типа Wi-Fi и Wi-MAX [9]. При этом расширение частотного спектра сигналов, позволит осуществлять передачу при меньших отношениях сигнал/шум. Это повышает электромагнитную совместимость беспроводных каналов передачи информации, что особенно актуально для современного общества, в котором происходит стремительный рост информационных потоков.

Существующие системы связи, использующие сверхширокополосные видеосигналы в качестве передаваемых сигналов имеют дальности связи порядка десятков-сотен метров. Такие системы связи недостаточно эффективны из-за невозможности эффективного излучения одним антенно-фидерным устройством сигнала с шириной полосы в несколько гигагерц при положении максимума спектра вблизи нулевой частоты, а также наличие лицензируемого диапазона частот, который накладывает ограничения на спектральную плотность мощности сигнала в диапазоне до 3,1 ГГц, где и сосредоточен её максимум [2].

Использование последовательности СШП КРС позволят перенести спектр сигнала в область более высоких частот, что поспособствует решению проблемы с эффективным излучением сигнала. Дальности связи таких систем радиосвязи и передачи данных могут составить десятки километров, что сопоставимо с современными системами широкополосного беспроводного доступа, при этом скорость передачи данных увеличивается на несколько порядков. Главным же достоинством систем радиосвязи и передачи данных, базирующихся на СШП КРС, в отличие от существующих военных систем радиосвязи, является скрытность, не позволяющая противнику установить факт выхода в эфир абонентов, из-за низкой спектральной мощности сигнала, а в гражданском применении — повторно использовать занятые другими абонентами полосы частот.

В работе рассматривалось обнаружение когерентной последовательности СШП КРС с неизвестной длительностью, когда амплитуды и фазы СШП КРС неизвестны на приёмной стороне, но одинаковы для всех импульсов последовательности. Была синтезирована структура обнаружителя последовательности СШП КРС и исследована его эффективность путём расчёта его основных характеристик – вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска сигнала.

Разработка и анализ алгоритмов обнаружения последовательности СШП КРС с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью, позволяет внести значительный вклад в развитие статистической радиофизики, поскольку они являются универсальными и выбором модулирующей функции можно обеспечить полосу сигнала, близкую к центральной частоте, тем самым получить необходимые выражения для узкополосного или широкополосного радиосигнала, а наличие или отсутствие гармонической компоненты — для сверхширокополосных квазирадисигнала и видеосигнала, соответственно. Анализ алгоритмов обнаружения последовательности СШП КРС позволяет выбрать схему обнаружителя в соответствии с потребной точностью функционирования и потенциальной вычислительной мощностью устройства и положить основу практической реализации систем радиосвязи и передачи данных нового поколения, которые не регистрируются известными средствами ведения радиоразведки и имеют, по сравнению с современными системами широкополосного беспроводного доступа, скорость передачи данных на несколько порядков выше при сопоставимой дальности связи.

Литература

1. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Сравнение характеристик алгоритмов обнаружения сверхширокополосных сигналов // *Успехи современной радиоэлектроники*. М., 2016. № 11. С. 193–199.
2. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов на фоне помех. М., 2009.
3. Трифонов А.П., Беспалова М.Б. Сверхширокополосное обнаружение цели при зондировании разрывными импульсами // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. М., 2003. Т. 46. № 5. С. 3–10.
4. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Квазиправдоподобное обнаружение сверхширокополосного квазирадисигнала произвольной формы с неизвестной длительностью // *Радиотехника*. М., 2016. № 6. С. 99–105.
5. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э., Титов К.Д. Эффективность обнаружения одного класса сверхширокополосных сигналов в условиях параметрической априорной неопределённости // *Журнал технической физики*. М., 2018. № 8. С. 1235–1240.

6. Трифонов А.П., Руднев П.Е. Обнаружение сверхширокополосного квазирегионального сигнала на фоне белого шума // Известия вузов. Радиофизика. М., 2009. Т. 52. № 9. С. 749–760.
7. Филькенштейн М.И. Основы радиолокации: учебник для вузов М., 1983.
8. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов М., 1963.
9. Rahayu Y., Abd T., Ngah R. Ultra Wideband Technology and Its Applications, 2008.

СПИНОВЫЕ ВОЛНЫ В ТРЁХМЕРНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ

Шараевская А.Ю.¹, Попов П.А.²

¹ИРиЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

²МФТИ ГУ, Долгопрудный, Россия

E-mail: annasharik2@gmail.com

Исследования свойств ферромагнитных материалов активно проводятся последнее время для потенциальных устройств спинтроники [1]. Свойства МСВ, распространяющихся в таких структурах, существенно зависят от внешнего магнитного поля, материала и формы волновода, определяющих, кроме прочего, распределение внутренних полей. Кроме того, подобные геометрии позволяют создавать связанные структуры, свойства МСВ в которых оказываются отличными от таковых в изолированных плёнках.

В данной работе были исследованы свойства МСВ в ферромагнитной плёнке в форме меандра, имеющей периодичность в направлении оси. Для расчётов были использованы параметры железо-иттриевого граната. В первом случае, в структуре возможно распространение поверхностных МСВ (ПМСВ) Дэймона-Эшбаха [2], во втором — прямых объёмных и обратных объёмных МСВ (ПОМСВ и ООМСВ) [3]. Для обоих случаев с помощью пакета COMSOL были получены дисперсионные характеристики с характерными для периодических структур запрещёнными зонами и профили потенциала МСВ [4]. С помощью микромагнитного моделирования методом конечных разностей был определен коэффициент пропускания для разных частот волн ПОМСВ, находящийся в хорошем соответствии с дисперсионными характеристиками, полученными с помощью развитой теоретической модели. Для случая ПОМСВ и ООМСВ были так же найдены распределения внутренних полей.

В данной работе было исследовано распространение спиновых магнитостатических волн (МСВ) в изолированных и вертикально связанных плёнках ферромагнетика в форме меандра с использованием микромагнитного моделирования и теоретических расчётов. Полученные дисперсионные и характеристики указывают на возможность использования таких структур в устройствах спинтроники как логических элементов и фильтров МСВ. Работа поддержана РФФИ (гранты № 18-37-00373, 18-37-20048, 18-57-00006 Бела) и Правительством Российской Федерации (соглашение № 074-02-2018-286) в рамках лаборатории “Терагерцовая спинтроника” Московского физико-технического института (государственного университета).

Литература

1. Spin Wave Confinement, Ed. by S.O. Demokritov. Singapore: Pan Stanford Pte. Ltd, 2008.
2. Damon R. W., Eschbach J. // J. Phys. Chem. Solids. 1961. V. 19. № 3–4. P. 308.
3. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994.
4. Beginin E.N., Sadovnikov A.V., Sharaevskaya A.Y. et al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. № 12. P. 122404.

МАСШТАБ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ,
ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ ПО ДАННЫМ GPS

Шербоев М.А.

*КФУ, институт физики, Казань, Россия**E-mail: ashuralizoda.91@gmail.com*

Крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения являются волнообразными возмущениями ионосферной плазмы. Одним из первых Бир [1] предсказал то движущийся солнечный терминатор может служить источником гравитационных волн, подобных солнечному затмению. В отличие от других источников, солнечный терминатор является регулярным, четко определенным и предсказуемым явлением. Таким образом, это привлекает внимание многих исследователей. Сомских [1987, 1992, 1995] математически проанализировал регулярные и нерегулярные возмущения, вызванные солнечным терминатором. Он предположил, что регулярные волны могут генерироваться несколькими механизмами, такими как движущиеся градиенты атмосферных параметров, создаваемые солнечным терминатором, неустойчивостью градиентного излучения и неустойчивостью градиент-дрейф в области солнечных терминаторов. Поскольку эти волны распространяются внутри термосферы, они могут вызывать колебания ионосферы. В этой работе мы представляем статистическое исследование крупномасштабных солитоноподобных ионосферных волновых возмущений (КСИВВ) за 14 месяцев, сгенерированное движущимся солнечным терминатором с ноября 2015 года по декабрь 2016 года, с использованием данных GPS-сети расположенных в Приволжском регионе РФ. В Приволжском регионе РФ расположено некоторое количество GPS приёмников. В этой работе было использовано данные полученных с ГНСС-приемников, расположенных в Казани (KZN) и Астрономической обсерватории им. В. П. Энгельгардта (ЕАО). Эти приёмные пункты предоставляют данные GPS с временным разрешением 30 с. В результате обработки экспериментальных данных полученных на данных пунктах получено что генерация КСИВВ при прохождении утреннего и вечернего солнечного терминатора происходит не каждый день. Количество таких случаев зависит от сезона года. Критерии по которым мы идентифицируем ионосферные возмущения как крупномасштабные волновые возмущения (КВВ) это их амплитуда и длительность распространения фазового фронта. Полный размах амплитуда КВВ должна превышать 0,5 TECU (1 TECU=1016 эл/м²) и длительность распространения фазового фронта возмущения КВВ должна быть больше 20 мин.. Эти критерии основаны на предыдущих исследованиях. Масштабы полученных солитоноподобных возмущений при прохождении СТ варьируется в пределах 30–160 мин. Эти солитоноподобные возмущения мы квалифицировали на среднемасштабные (от 30 до 60 мин.) и крупномасштабные (с продолжительностью более 60 мин.).

Литература

1. Beer T.//Nature 1973. V. 242. № 5392. P. 34.
2. Beer T. On atmospheric wave generation by the terminator//Planet. Space Sci. -1978.-V. 26, N 2. -P. 185–188.
3. Baran W. L., Shagimuratov I. I., Tepenytzyna N. Yu. The use of GPS for ionospheric studies//Artificial satellites 1997, Warszawa, 1997, V.32, N 1, pp. 49–60.
4. Гуревич, А.В. Нелинейные явления в ионосфере /А.В. Гуревич // УФН. 2007. Т. 177, № 11. – С. 1145–1177.
5. Сомских В. М. , Троицкий Б. В. Геомагнетизм и аэронавигация. 1975. Т. 15. С. 856.
6. Сомских В. М. Ионосфера и солнечно-земные связи. Алма-Ата: Наука 1977. С. 77.
7. Сомских В. М. Ионосфера и солнечно-земные связи. Алма-Ата: Наука 1985. С. 85.
8. Somsikov V.M. Solar terminator and dynamic phenomena in the atmosphere. // Scientific journal "Geomagnetism and Aeronomy", 2011, vol. 51, No. 6, p. 723–735.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО
ДЕЙСТВИЯ МАЛОШУМЯЩЕГО СВЧ – ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Щекотков П.Н.

*МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия**E-mail: shchekot@yandex.ru*

Современная микроэлектроника позволяет создавать малогабаритные твердотельные СВЧ устройства с низким энергопотреблением. Однако для целого ряда применений, например космической отрасли, крайней важной характеристикой является КПД.

В нашей работе анализируются пути повышения КПД твердотельного интегрально-го малошумящего СВЧ генератора с сохранением его основных характеристик: долго-временной и кратковременной стабильности частоты, фазы и амплитуды.

Выходной сигнал генератора подвержен случайным флуктуациям, которые проявляются в шумовых составляющих амплитуды, фазы и частоты. Отметим, что флуктуации фазы и частоты связаны между собой. Поэтому для СВЧ генераторов особое значение имеет фазовый шум.

На высоких и, особенно, сверхвысоких частотах фазовый шум приводит к нежелательной фазовой и частотной модуляции, и как следствие расширению спектра сигнала, что далеко не всегда желательно.

Литература

1. Белов Л. Компоненты генераторов стабильной частоты. Генераторы, управляемые напряжением. –М.: ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004;
2. Белов Л. Хилькевич В. Генераторы СВЧ с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты. -М.: ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, №7;
3. Проектирование генератора миллиметрового диапазона длин волн. А. Бунин, С. Вишняков, В. Геворкян, ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008 г. №6.

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОФИЗИКА

Время транзитного захвата при неадиабатической фазовой автоподстройке частоты.....	551
Арсланов А.А.	
Исследование параметров и эффективной площади коллекторов ЭГД-ячейки.....	552
Бабушкин М.Д.	
Методы модернизации квантового стандарта частоты на атомах рубидия - 87	554
Валов А.П., Петров А.А., Рудь В.Ю.	
Коммутатор питания магнитных элементов канала транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон ускорительного комплекса NICA	555
Винник Д.С.	
Нелинейные эффекты при распространении мощных наносекундных СВЧ импульсов в слабопроводящих средах	556
Глазунов П.С.	
Влияние расположения электродов в воде на характер импульсного разряда распространяющегося над её поверхностью	558
Горячкин П.А.	
Методы измерения параметров сигналов плазменного сверхширокополосного СВЧ-источника	559
Диаз Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Стрелков П.С., Тараканов В.П., Шумейко Д.В.	
Оценка влияния мешающих сигналов на канал передачи данных стандарта IEEE 802.11n по имитационной модели в среде MATLAB	560
Титов К.Д., Завалишина О.Н.	
Широкоапертурная геометрия акустооптического взаимодействия в монокристалле бромида ртути	561
Зинкин Д.В., Пороховниченко Д.Л.	
Энергетический анализ потоков в плазменном ракетном двигателе	562
Ивандиков Ф.И.	
Исследование аномального отражения твердых МДС с нанометровым проводящим покрытием	564
Иванов Р.А., Морозов С.И., Фитаев И.Ш.	
Измерение потерь в дисковых кремниевых резонаторах, вносимых электростатическим полем	565
Клочков Я.Ю.	
Исследование влияния температуры на характеристики акустооптических фильтров	566
Костылева Е.И., Манцевич С.Н.	
Широкополосное согласование электрических параметров пьезоэлектрического преобразователя акустооптического фильтра	567
Кучумов И.Д.	
Улучшение метрологических характеристик малогабаритного микроволнового стандарта частоты на ионах Hg^+	568
Лукашев Н. А.	
Система обработки большого массива экспериментальных данных по измерениям ПЭС в ионосфере, полученных на Приволжской сети ГНСС станций	570
Максимов Д.С.	
Исследование механизмов излучения катушки индуктивности.....	572
Молодцов В.В.	
Устройство компенсации активных помех для малогабаритной активной фазированной антенной решетки	573
Мороз А.В., Маланин К.Ю., Краснов А.А., Рудь В.Ю.	
Анализ разрушения проводящих гибких нанометровых пленочных структур под воздействием СВЧ- излучения	575
Морозов С.И., Иванов Р.А., Фитаев И.Ш.	
Антенные устройства СВЧ комплексов для загоризонтного радиомониторинга.....	577
Никитина М.И.	
Предельные токи электронных пучков в пролётных каналах вакуумных устройств субтерагерцового диапазона	579
Овсянников Н.Е.	

Осцилляторы терагерцовых частот на основе антиферромагнетиков с выраженной магнитоупругой связью	580
Попов П.А.	
Современные антенны, используемые в системе радиомониторинга.....	581
Синицына Е.А.	
Управление диаграммой направленности фазированной антенной решетки для подвижной радиосвязи с удаленным объектом.....	582
Стрельник А. И.	
Волновые аналоги сред на основе схем фазовой автоподстройки частоты	583
Судеев Б.П.	
Особенности пятого поколения мобильной связи	585
Тадевосян С.Р.	
Обнаружение когерентной последовательности сверхширокополосных квазирадисигналов с неизвестными параметрами на фоне шума.....	587
Титов К.Д.	
Спиновые волны в трёхмерных ферромагнитных структурах	589
Шараевская А.Ю., Попов П.А.	
Масштаб ионосферных волновых возмущений, генерируемых солнечным терминатором по данным GPS.....	590
Шербоев М.А.	
Физические принципы повышения коэффициента полезного действия маломощного СВЧ – твердотельного генератора.....	591
Щекотков П.Н.	