

**А.Н. Зикий, А.С. Кочубей**

### **ГЕНЕРАТОР ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

*Гетеродин приёмника и задающий генератор передатчика являются важнейшими составными частями, определяя их стабильность и диапазонные свойства. В последние годы завод «Метеор» создал ряд новых микросхем генераторов, управляемых напряжением (ГУН), с высокими электрическими параметрами. Однако рекламные материалы предприятия не содержат ряд параметров, важных с точки зрения потребителя. Целью данной работы является исследование основных характеристик генератора, в том числе не задекларированных поставщиком: ширины спектра сигнала, средней крутизны модуляционной характеристики, уровня гармоник. Объектом исследования является микросхема ГУН382 в типовой схеме включения. Представлены результаты экспериментального исследования ГУН, работающего в области 1200 МГц. Дана оценка паразитных продуктов в спектре выходного сигнала. Спектр выходного сигнала демонстрирует малую ширину спектральной линии. Измерены модуляционные характеристики при изменении управляющего напряжения и напряжения питания, вычислена их средняя крутизна. Эти данные позволяют предъявить обоснованные требования к стабильности управляющего и питающего напряжений. Полученные результаты могут быть использованы в приемо-передающей аппаратуре связи, навигации, радиоэлектронной борьбы. Статья расширяет представление о линейке генераторов завода «Метеор», демонстрирует их высокие электрические характеристики: диапазон рабочих частот  $1200 \pm 16$  МГц; выходная мощность не менее 1 дБм; напряжение питания + 5 В; управляющее напряжение от 0 до 8 В; уровень второй и третьей гармоники не превышает минус 22 дБ по отношению к полезному сигналу.*

*Генератор; управляемый напряжением; дециметровый диапазон волн; эксперимент; модуляционная характеристика; ширина спектра; уровень гармоник.*

**A.N. Zikiy, A.S. Kochubey**

### **DECIMETER RANGE GENERATOR**

*The receiver's heterodyne and the transmitter's master oscillator are the most important components, as they determine their stability and range properties. In recent years, the Meteor plant has created a number of new voltage-controlled generator chips with high electrical parameters. However, the advertising materials of this company do not contain a number of parameters that are important from the point of view of the consumer. Therefore, the purpose of this work is to study the main characteristics of the generator, including those not declared by the supplier: the width of the signal spectrum, the average steepness of the modulation characteristic, the level of harmonics. The object of the study is the GUN382 microchip in a typical switching circuit. The results of an experimental study of a VCO operating in the 1200 MHz region are presented. The estimation of parasitic products in the spectrum of the output signal is given. Photos of the spectrum of the output signal showing a small width of the spectral line are presented. The modulation characteristics are measured when the control voltage and supply voltage change, and their average steepness is calculated. These data allow us to make reasonable requirements for the stability of the control and supply voltages. The results obtained can be used in receiving and transmitting equipment for communication, navigation, and electronic warfare. The article expands the idea of the line of generators of the Meteor plant, demonstrates their high electrical characteristics: operating frequency range  $1200 \pm 16$  MHz; output power of at least 1 dBm; supply voltage + 5V; control voltage from 0 to 8 V; the level of the second and third harmonics does not exceed minus 22 dB in relation to the useful signal.*

*Generator; voltage-controlled; decimeter wavelength range; modulation characteristics of the experiment; width of the spectrum; level of harmonics.*

**Введение.** Генераторы, управляемые напряжением (ГУН), находят широкое применение в качестве гетеродинов приёмников, задающих генераторов передатчиков, используются в составе синтезаторов частот и измерительных генераторов. Их исследованию посвящена обширная литература, в том числе монографии [1–8], учебные пособия [9, 10], статьи [11–18]. Появление новой элементной базы [19, 20] стимулирует дальнейшие исследования. Объектом исследования является ГУН типа ГУН382-1-В-1200М-5 (изготовитель завод «Метеор»). Достоинством выбранной модели ГУН является малые габариты и масса, низкое токопотребление, высокая линейность модуляционной характеристики, низкий уровень фазовых шумов и гармоник основной частоты. Целью работы является исследование характеристик и параметров генератора, незадекларированных изготовителем.

**Схема и конструкция.** Схема включения ГУН приведена на рис. 1. Она соответствует типовой схеме включения этого генератора.

Конструкция генератора представляет собой печатную плату, с одной стороны которой установлены все навесные элементы, а монтаж выполнен на другой стороне платы. Плата изготовлена из фольгированного стеклотекстолита размером 70х30х1,5 мм. В качестве выходного СВЧ соединителя использована розетка типа СР-50-727. В качестве низкочастотного соединителя для подачи питания и управления использована вилка типа СНП346-10ВП-21-2-В. Используются конденсаторы типов КТ, КМ6 и К10-17а.

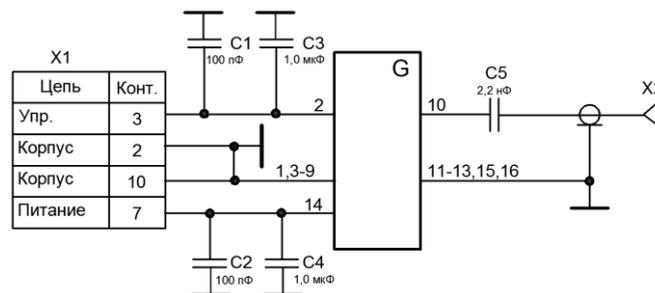


Рис. 1. Схема включения ГУН382-1-В-1200М-5

**Эксперимент.** Целью эксперимента является исследование основных параметров и характеристик генератора.

Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рис. 2.

В первом эксперименте исследовали зависимости частоты и мощности от управляющего напряжения. Результаты измерений сведены в табл. 1. По данным таблицы построены графики на рис. 3, из которых видно, что изменение частоты составило 32,7 МГц, а изменение мощности равно 1,85 дБ.

Во втором эксперименте снимались зависимости частоты и мощности ГУН от напряжения питания. Результаты измерений представлены в табл. 2. По данным таблицы построены графики на рис. 4. Из графиков видно, что изменение частоты составило 0,3 МГц, а изменение мощности равно 0,65 дБ.

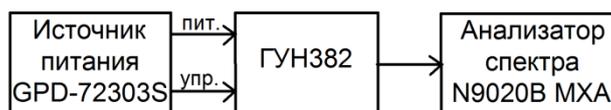


Рис. 2. Структурная схема измерительного стенда

В третьем эксперименте проводилось фотографирование спектра выходного сигнала при управляющем напряжении 4 В. График спектра выходного сигнала приведён на рис. 5. При этом полоса пропускания анализатора спектра составила 10 кГц. Ширина спектра сигнала на уровне минус 3 дБ от максимума составляет 10 кГц, что свидетельствует о высокой добротности резонансной системы. Для оценки уровня гармонических составляющих получен спектр выходного сигнала в широкой полосе. График спектра гармоник с указанными уровнями изображён на рис. 6.

Таблица 1

**Зависимость частоты и мощности от управляющего напряжения**

Управляющее напряжение $U_{упр}$ , В	Частота $f$ , МГц	Выходная мощность $P_{вых}$ , дБм
0	1184	-4.76
0.5	1186.9	-5.09
1.0	1188.5	-4.85
1.5	1190.3	-4.37
2.0	1192.1	-4.67
2.5	1193.9	-4.59
3.0	1195.9	-4.32
3.5	1198.1	-4.25
4.0	1200.5	-3.62
4.5	1203.1	-3.94
5.0	1205.7	-3.76
5.5	1208.1	-3.24
6.0	1210.3	-3.47
6.5	1212.3	-3.69
7.0	1214.1	-4.12
7.5	1215.5	-4.18
8.0	1216.7	-4.17

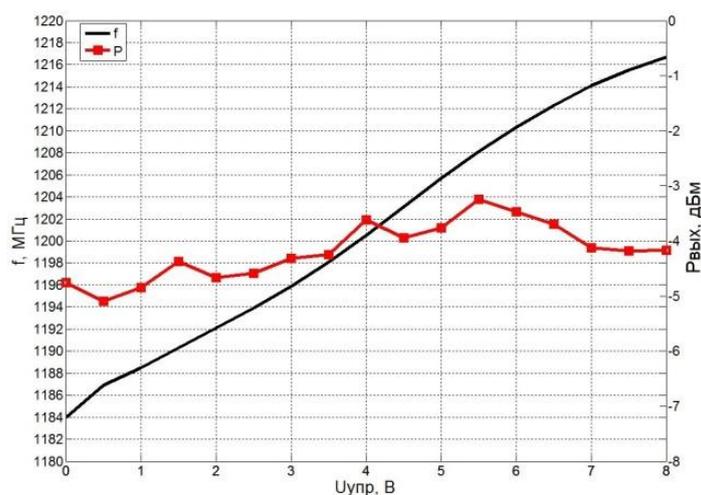


Рис. 3. Модуляционные характеристики ГУН

Таблица 2

Зависимость частоты и мощности от напряжения питания

Напряжение питания Uпит, В	Выходная частота f, МГц	Выходная мощность Pвых, дБм
4.75	1200.509	-3.96
4.8	1200.486	-3.94
4.85	1200.452	-3.87
4.9	1200.433	-3.76
4.95	1200.396	-3.81
5.0	1200.366	-3.66
5.05	1200.340	-3.62
5.1	1200.307	-3.53
5.15	1200.278	-3.58
5.2	1200.245	-3.37
5.25	1200.214	-3.31

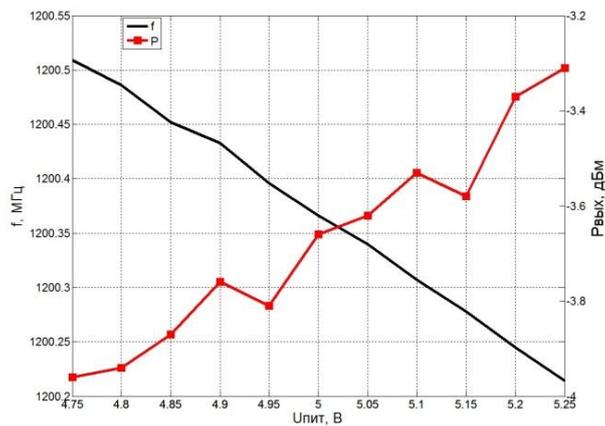


Рис. 4. Зависимость частоты и мощности от напряжения питания

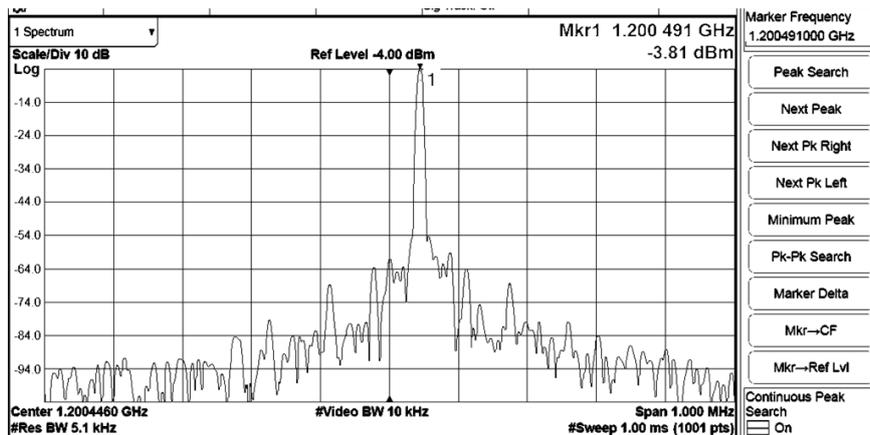


Рис. 5. Спектр выходного сигнала ГУН в ближней зоне

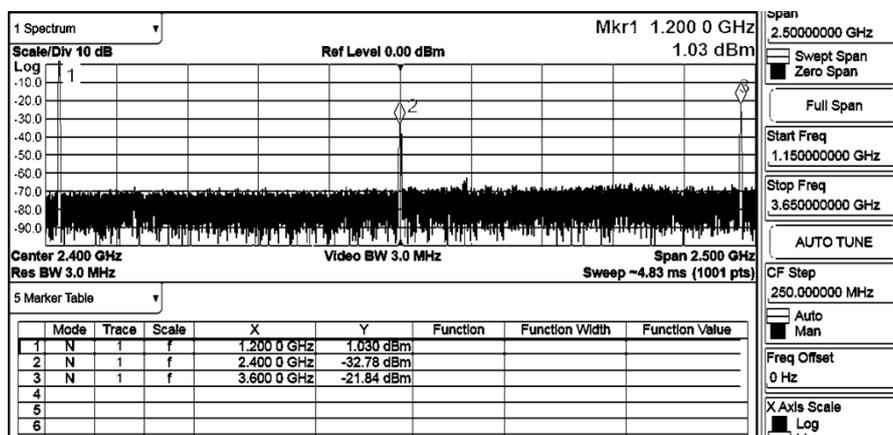


Рис. 6. Спектр гармоник выходного сигнала ГУН

**Выводы.** Данные табл. 3 позволяют сравнить заданные и достигнутые параметры ГУН.

Таблица 3

### Основные параметры ГУН

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Номинальное значение частоты, МГц	1200	1200 ± 16
Диапазон электронной перестройки частоты, МГц	± 12	± 16
Выходная мощность, не менее, дБм	0	1
Нестабильность частоты от напряжения питания, при изменении напряжения питания на ± 5 % от номинального значения, не более, ppm	± 250	± 125
Ширина спектра выходного сигнала на уровне минус 3 дБ от максимума, кГц	–	10
Средняя крутизна модуляционной характеристики по частоте при изменении управляющего напряжения, МГц/В	–	4
Средняя крутизна модуляционной характеристики по частоте при изменении питающего напряжения, МГц/В	–	0,59
Уровень второй гармоники по отношению к первой, дБ	–	– 33
Уровень третьей гармоники по отношению к первой, дБ	–	– 22

Из таблицы видно, что все требования к генератору выполняются, с превышением. Генератор имеет высокий технологический запас и возможность модернизации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Michal Odyniec*. RF and Microwave Oscillator Design. Artech House, Boston, London, 2002. – 398 p.
2. *Pieter L.D. Abrie*. Design of RF and Microwave Amplifiers and Oscillators. Artech House, Boston, London, 1999. – 480 p.
3. *Ali Hajimiri, Thomas H. Lee*. The Design of Low Noise Oscillators. Kluwer Academic Publishers, New York et al, 2003. – 207 p.
4. *Andrei Grebennikov*. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. John Wiley & Sons, Ltd. – 2007.
5. *Соколинский В.Г., Шейнкман В.Г.* Частотные и фазовые модуляторы и манипуляторы. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
6. *Кочемасов В.Н., Белов Л.А., Оконешиников В.С.* Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией. – М.: Радио и связь, 1983. – 192 с.
7. *Верещагин Е.М.* Модуляция в генераторах СВЧ. – М.: Сов. радио, 1972. – 304 с.
8. *Фаго Ж., Мань Ф.* Частотная модуляция. Теория и применение в радиорелейных линиях. – М.: Сов. радио, 1964. – 695 с.
9. *Зикий А.Н., Помазанов А.В.* Передатчики помех современным средствам связи: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – 176 с.
10. *Белов Л.А.* Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 320 с.
11. *Зикий А.Н., Давтян А.Д.* Генератор, управляемый напряжением // Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире. Уфа, март 2020. – С. 23-29.
12. *Андрианов А.В., Давтян А.Д., Зикий А.Н.* Генератор ЧМ сигналов // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5722/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5722/).
13. *Андрианов А.В., Зикий А.Н., Падалко А.Д.* Задающий генератор для передатчика скользких помех // Сб. научных трудов 14 международной конференции «Наука России: цели и задачи». Ч. 4. – Екатеринбург: НИЦ «Л-Журнал», 2019. – С. 5-8.
14. *Горевой А.В.* Генераторы диапазона 1–2 ГГц с повышенной крутизной регулировочной характеристики // Электроника, информационные технологии, радиотехника и связь: Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 1923. – С. 44-49.
15. *Мальшиев В.М.* и др. Модель варикапа для разработки сверхширокополосных перестраиваемых генераторов СВЧ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 2 (193). – С. 55-60.
16. *Никитин А.Б., Хабитуева Е.И.* Особенности разработки сверхширокополосных перестраиваемых генераторов СВЧ-диапазона в гибридном исполнении // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 41-50.
17. *Мазеев Е.В., Фурсаев М.А.* Проектирование СВЧ транзисторного генератора с варакторной перестройкой частоты и моделирование его электрических характеристик // Вестник СГТУ. – 2011. – № 3(57). – Вып. 1. – С. 68-73.
18. *Романюк В.* Проектирование СВЧ-генератора, управляемого напряжением // Современная электроника. – 2010. – № 2. – С. 46-51.
19. СВЧ генератор ГУН382-1-B-1-1200M-5. Этикетка завода «Метеор». – 2020. – 2 с.
20. Стратегия повышения надёжности. Каталог АО «Завод «Метеор». – 2020. – 84 с.

## REFERENCES

1. *Michal Odyniec*. RF and Microwave Oscillator Design. Artech House, Boston, London, 2002, 398 p.
2. *Pieter L.D. Abrie*. Design of RF and Microwave Amplifiers and Oscillators. Artech House, Boston, London, 1999, 480 p.
3. *Ali Hajimiri, Thomas H. Lee*. The Design of Low Noise Oscillators. Kluwer Academic Publishers, New York et al, 2003, 207 p.
4. *Andrei Grebennikov*. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
5. *Sokolinskiy V.G., Sheynkman V.G.* Chastotnye i fazovye modulyatory i manipulyatory [Frequency and phase modulators and manipulators]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.

6. *Kochemasov V.N., Belov L.A., Okoneshnikov V.S.* Formirovanie signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Formation of signals with linear frequency modulation]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 192 p.
7. *Vereshchagin E.M.* Modulyatsiya v generatorakh SVCh [Modulation in microwave generators]. Moscow: Sov. radio, 1972, 304 p.
8. *Fago Zh., Man' F.* Chastotnaya modulyatsiya. Teoriya i primeneniye v radioreleynykh liniyakh [Frequency modulation. Theory and application in radio relay lines]. Moscow: Sov. radio, 1964, 695 p.
9. *Zikiy A.N., Pomazanov A.V.* Peredatchiki pomekh sovremennym sredstvam svyazi: ucheb. posobie [Transmitters of interference to modern means of communication: training manual]. Rostov-on-Don – Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, 176 p.
10. *Belov L.A.* Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty: ucheb. posobie [Devices for forming microwave signals and their components: textbook]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEL, 2010, 320 p.
11. *Zikiy A.N., Davtyan A.D.* Generator, upravlyaemy napryazheniem [Generator controlled by voltage. In the collection], *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: innovatika v sovremennom mire* [Fundamental and applied scientific research: Innovation in the modern world]. Ufa, mart 2020, pp. 23-29.
12. *Andrianov A.V., Davtyan A.D., Zikiy A.N.* Generator ChM signalov [FM signal generator], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, No. 2. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5722/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5722/).
13. *Andrianov A.V., Zikiy A.N., Padalko A.D.* Zadayushchiy generator dlya peredatchika skol'zyashchikh pomekh [Setting generator for a sliding interference transmitter], *Sb. nauchnykh trudov 14 mezhdunarodnoy konferentsii «Nauka Rossii: tseli i zadachi»* [Collection of scientific papers of the 14th International Conference "Science of Russia: goals and objectives"]. Part 4. Ekaterinburg, NITS «L-Zhurnal», 2019, pp. 5-8.
14. *Gorevoy A.V.* Generatory diapazona 1–2 GGts s povyshennoy krutiznoy regulirovochnoy kharakteristikoy [Generators of the range 1-2 GHz with increased steepness of the adjustment characteristics], *Elektronika, informatsionnye tekhnologii, radiotekhnika i svyaz': Doklady TUSURa* [Electronics, information technologies, radio engineering and communications. Reports of TUSUR], 2011, No. 1923, pp. 44-49.
15. *Malyshev V.M. i dr.* Model' varikap dlya razrabotki sverkhshirokopolosnykh prestraivaemykh generatorov SVCh [Varicap model for the development of ultra-wideband tunable microwave generators], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [Scientific and technical vedomosti SPbGPU], 2014, No. 2 (193), pp. 55-60.
16. *Nikitin A.B., Khabituieva E.I.* Osobennosti razrabotki sverkhshirokopolosnykh prestraivaemykh generatorov SVCh-diapazona v gibridnom ispolnenii [Features of the development of ultra-wideband tunable microwave generators in hybrid design], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [Scientific and Technical Bulletin of SPbGPU], 2017, Vol. 10, No. 4, pp. 41-50.
17. *Mazeev E.V., Fursaev M.A.* Proektirovanie SVCh tranzistorного генератора s varaktor-noy perestroykoy chastoty i modelirovanie ego elektricheskikh kharakteristik [Design of a microwave transistor generator with varactor frequency tuning and modeling of its electrical characteristics], *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU], 2011, No. 3 (57), Issue 1, pp. 68-73.
18. *Romanyuk V.* Proektirovanie SVCh-генератора, upravlyaemogo napryazheniem [Designing a voltage-controlled microwave generator], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2010, No. 2, pp. 46-51.
19. SVCh generator GUN382-1-V-1-1200M-5. Etiketka zavoda «Meteor» [Microwave generator GUN382-1-V-1-1200M-5. Label of the plant "Meteor"], 2020, 2 p.
20. Strategiya povysheniya nadezhnosti. Katalog AO «Zavod «Meteor» [Strategy for improving reliability. Catalog of JSC "Plant "Meteor"], 2020, 84 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

**Зикий Анатолий Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [zikiy50@mail.ru](mailto:zikiy50@mail.ru); г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

**Кочубей Алексей Сергеевич** – Таганрогский научно-исследовательский институт связи; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89896270939; магистр, инженер-конструктор 2 категории.

**Zikiy Anatoliy Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

**Kochubey Alexey Sergeevich** – Taganrog Scientific Research Institute of Communications; e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896270939; Master, design engineer of the 2nd category.

УДК 621.396.677.49

DOI 10.18522/2311-3103-2021-2-91-104

**А.О. Касьянов**

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

*Статья посвящена анализу результатов численного исследования характеристик рассеяния печатного пространственного и частотно-избирательного антенного обтекателя на основе электродинамического моделирования частотно-избирательных поверхностей с диэлектрическими укрытиями. Задачи моделирования решены методом интегрального уравнения. С помощью разработанной математической модели выполнено всестороннее численное исследование микроволновых устройств пространственной, частотной и поляризационной трансформации и селекции, выполненных в виде многоэлементных мультипланарных печатных отражательных антенных решеток. На основе проведенных исследований найдены конструктивные решения для частотно-селективных структур в интегральном исполнении, реализующих функции пространственных и частотных фильтров. Рассмотрены вопросы конструктивного синтеза многослойных планарных частотно-избирательных поверхностей для создания пространственных и частотных фильтров, интегрируемых в излучающие и распределительные системы современных многоэлементных антенных решеток в печатном исполнении. Получены численные результаты электродинамического моделирования частотно-избирательных поверхностей и угловых фильтров с диэлектрическими укрытиями, которые могут быть использованы для выбора наиболее рациональных вариантов топологий частотно-избирательных поверхностей и угловых фильтров при разработке многофункциональных обтекателей в антенных системах микроволнового диапазона. На основе полученных численных данных рассматриваются возможности применения трех вариантов плоских дифракционных решеток в качестве частотных фильтров и два варианта решеток в качестве пространственных фильтров в составе антенных обтекателей. Предложенные в работе пространственные частотные фильтры в виде мультипланарных печатных решеток, входящих в состав антенных обтекателей, предназначены для обеспечения электромагнитной совместимости близкорасположенных радиоэлектронных средств, функционирующих в смежных частотных диапазонах, и содержащих сканирующие антенные решетки, устанавливаемые под антенными обтекателями. В то же время установка в антенных обтекателях, предложенных в работе угловых фильтров, выполненных в виде многослойных печатных дифракционных решеток проходного типа, позволяет устранить появление нежелательных побочных главных максимумов в диаграммах направленности разреженных цифровых антенных решеток перспективных радиотехнических комплексов микроволнового диапазона длин волн.*

*Частотно-избирательная поверхность; угловой фильтр; многофункциональный антенный обтекатель; метод интегрального уравнения; многослойные диэлектрические укрытия; поляризационная матрица рассеяния.*