

Разработка генератора управляемых напряжений с цифровой настройкой для многофункциональной радиолокационной станции

Д.А. Рыжова^{1,a,*} В.Б. Фадеенко^{1,b†}

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт электроники и телекоммуникаций, инфокоммуникационные технологии и системы связи
Россия, 194064, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 29
(Поступила в редакцию 31.05.2023; подписана в печать 15.02.2024)*

Обоснована необходимость разработки многофункциональных радиолокационных станций (РЛС) для решения различных задач, включая экологический мониторинг. Для решения ряда задач, включая экологический мониторинг воздушных пространств, установлена необходимость сканирования частоты излучаемого СВЧ-сигнала в диапазоне от 2 до 18 ГГц, с шагом перестройки 10 МГц. Рассмотрены проблемы, которые возникают в РЛС при реализации данного диапазона. Рассмотрены недостатки аналоговых генераторов управляемых напряжений (ГУН), которые используются в радиолокационных станциях для синтезирования сетки частот СВЧ в диапазоне несколько ГГц. Разработана конструкция ГУН с цифровой настройкой на российской элементной базе для реализации синтеза сетки частот СВЧ в диапазоне от 2 до 18 ГГц. Исследованы основные характеристики разработанного ГУН и проведено их сравнение с аналогичными разработками ведущего производителя в мире (компания Planar Monolithics Industries). Показана эффективность применения РЛС с разработанным ГУН для решения различных задач.

PACS: 84.30.Ng

УДК: 621.373

Ключевые слова: многофункциональная радиолокационная станция, радиационный контроль, генератор управляемых напряжений, цифровая настройка, длина волны, СВЧ-сигнал, отношение сигнал/шум.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется определению состояния водных и воздушных пространств, которое влияет на здоровье человека [1–8]. Это связано с увеличением различных выбросов вредных веществ (плановых выбросов, аварии или нарушения законодательства) [2, 8–13]. Особые сложности возникают при определении радиоактивных выбросов или загрязнений, связанных с ними, в атмосфере и на водной поверхности [8, 9, 13–17]. В атмосфере радиоактивные частицы образуют ионизированное образование — плазмод, который распространяется на большие расстояния (далее радиация выпадает в виде осадков). Радиолокационный метод — один из вариантов решения задачи радиационного контроля на дальних расстояниях в труднодоступных местах, определения состава радиоактивных образований в атмосфере, скорости и направления их движения. Этот метод можно использовать в любых погодных условиях [14, 15, 17–25]. Особенно в условиях открытых морских пространств, где очень много выбросов в атмосферу от подвижных объектов с атомной энергетической установкой, а также встречаются радиоактивные выбросы от других источников [13–19, 25]. Поэтому разработке многофункциональных РЛС морского базирования для решения различных задач (обнаружение объектов, опознавание целей и определение их пара-

метров, экологический мониторинг и прочие) уделяется большое внимание.

Необходимо отметить, что ионизированные частицы в атмосфере имеют малые размеры по сравнению с движущимися целями, поэтому отраженный от них сигнал очень слабый по мощности. Плазмод обычно состоит из разного рода частиц. Максимальный сигнал отражения от них формируется на частотах, соответствующих резонансному состоянию определенного радионуклидного изотопа, например, ^{16}N , ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{88}Kr . Поэтому для определения состава плазмоды и концентрации в нем радиоактивных изотопов необходимо обеспечить сканирование частоты излучения СВЧ-сигнала в диапазоне от 2 до 18 ГГц [15, 18, 19]. Кроме того, для обеспечения работы РЛС в условиях активных и пассивных помех, а также различных нежелательных эффектах в атмосфере, изменение частоты излучаемого СВЧ-сигнала в широком диапазоне позволяет решить эти проблемы.

В находящейся в эксплуатации РЛС перестройка частоты СВЧ-сигнала осуществляется в ограниченном диапазоне не более 2 ГГц по причине большого числа ограничений в системах формирования СВЧ-сигнала [26]. Одним из решений является использование генераторов управляемых напряжений (ГУН). Разработанные конструкции ГУН для других типов РЛС не подходят по скорости перестройки частоты, диапазону перестройки, линейностью модуляционной характеристики, значению ухода частоты от номинального после перестройки и т. д. Поэтому в нашей работе представлена новая конструкция ГУН с цифровой настройкой частоты. Данное устройство применяется в РЛС, в которых разделена приемная и передающая части (РЛС кругового обзора).

* qwdarya1234@gmail.com

† v21.07.96@mail.ru

1. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА УПРАВЛЯЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ЦИФРОВОЙ НАСТРОЙКОЙ

Классический генератор управляемых напряжений строится на основе двух устройств: радиочастотного генератора, который управляется напряжением, и аналогового преобразователя, с помощью которого осуществляется перестройка частоты [26–29]. При перестройке в большом диапазоне частот по причине нелинейности характеристик создаются большие сложности в реализации и устойчивой работе ГУН в составе РЛС.

На основе анализа работы действующих моделей ГУН нами предлагается следующая схема построения генератора управляемых напряжений с цифровой настройкой (ГУНЦН), которая представлена на рис. 1.

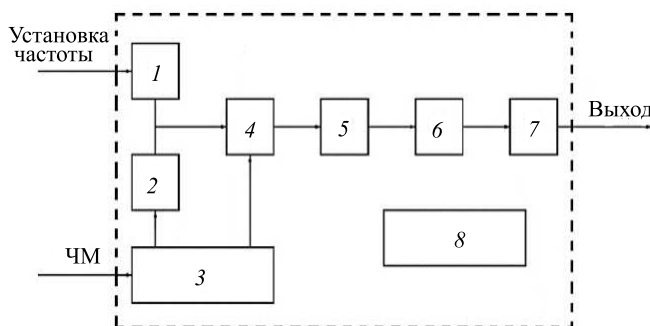


Рис. 1. Схема генератора, управляемых напряжений, с цифровой настройкой: 1 — запоминающее устройство; 2 — цифро-аналоговый преобразователь; 3 — частотно-модулированный линейаризатор; 4 — операционный усилитель; 5 — радиочастотный генератор, управляемый напряжением; 6 — усилитель; 7 — полосовой фильтр; 8 — система термостабилизации

Основой генератора с цифровой настройкой является термостатированный генератор, управляемый напряжением 4, не охваченный петлей обратной связи. На стадии разработки и производства генератора в запоминающее устройство 1 загружаются коды установки частоты, которые передаются в ЦАП 2. Эти коды необходимы для дополнительной цифровой калибровки устройства с использованием корректирующих кодов — для коррекции погрешностей цифровой настройки ГУН. Частотно-модулированный (ЧМ) сигнал подается в ЦАП 2, проходя через ЧМ-линеаризатор 3. При подаче на вход операционного усилителя 4 и корректирующих кодов на выходе формируется необходимое значение управляемого напряжения, которое затем поступает на вход ГУН 5. Изменение входного напряжения позволяет изменять частоту СВЧ излучения, подаваемого на параболическую антенну. Перед поступлением в излучательный элемент антенны сигнал СВЧ, полученный с помощью ГУНа, усиливается до необходимого уровня с помощью усилителя 6 и проходит

через фильтр 7, который отсекает паразитные составляющие.

Для исследования облака ионизационных образований необходимо изменение длин волн сигнала СВЧ излучения в диапазоне от 2 до 16 см. Поэтому был разработан широкополосный ГУН с цифровой настройкой с использованием в схеме нескольких переключаемых генераторов, управляемых напряжением, которое поступает с выхода ЦАП. Этот факт позволяет обеспечить высокое быстродействие, а также самое необходимое — широкую рабочую полосу частот ΔFr . На рис. 2 приведена схема разработанного ГУНа с цифровой настройкой в диапазоне частот ΔFr от 2 до 18 ГГц.

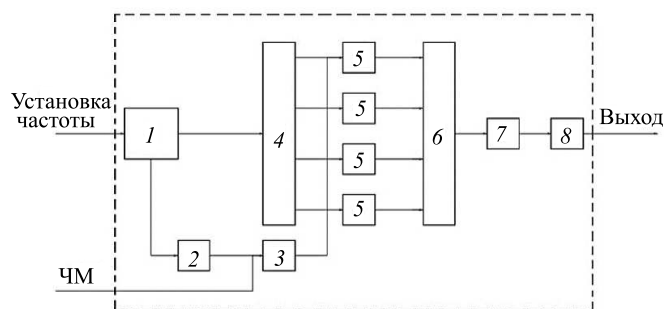


Рис. 2. Схема широкополосного генератора, управляемых напряжений с цифровой настройкой в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц: 1 — запоминающее устройство; 2 — цифро-аналоговый преобразователь; 3 — операционный усилитель; 4 — устройство переключения диапазонов; 5 — генератор, управляемый напряжением; 6 — сумматор; 7 — буферный усилитель; 8 — фильтр

Необходимо отметить, что разработанная нами конструкция широкополосного ГУНа имеет ряд особенностей, которые связаны с разделением диапазонов. Для перекрытия широкого диапазона частот ΔFr перестройки генератора с цифровой настройкой, а также для обеспечения высокого быстродействия, в разработанной конструкции используются четыре отдельных ГУНа 5. Разработанный широкополосный ГУНЦН имеет устройство для переключения диапазонов переключаемых частот в зависимости от необходимой F для исследования воздушного пространства. Каждый ГУН получает свои коды установки частоты F от запоминающего устройства 1 через ЦАП 2. Сигналы со всех генераторов 5 объединяются с помощью сумматора мощности 6 и поступают на выход устройства. Буферный усилитель 7 обеспечивает хорошую развязку выхода генератора и подключаемой нагрузки, а также поддерживает уровни выходного сигнала в пределах от 8 до 13 дБм. Выходы радиочастотных поддиапазонов в широкополосном усилителе подключаются выборочно к общему выходу устройства (в зависимости от требуемой для исследования частоты излучения).

Таблица. Сравнение характеристик генераторов с цифровой настройкой частоты с разработанным нами широкополосным ГУНЦН

	DTO-6G18G	DTO-218	Разработанный ГУНЦН
Диапазон частот, ГГц	6–18	2–18	2–18
Точность установки частоты, МГц	2.5	2.0	2.2
Дрейф частоты, МГц/°С	0.1	0.1	0.1
Макс. отклонение частоты, МГц	4.0	3.0	3.2
Модулирующие частоты, (мин), МГц	0–10	0–9	0–10
Уровень гармоник, дБн	-55	-20	-24

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА УПРАВЛЯЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ЦИФРОВОЙ НАСТРОЙКОЙ

Разработанный широкополосный генератор управляемых напряжений с цифровой настройкой (ГУНЦН) был исследован в лабораторных условиях. На рис. 3 в качестве примера представлена шумовая характеристика разработанного ГУНЦН.

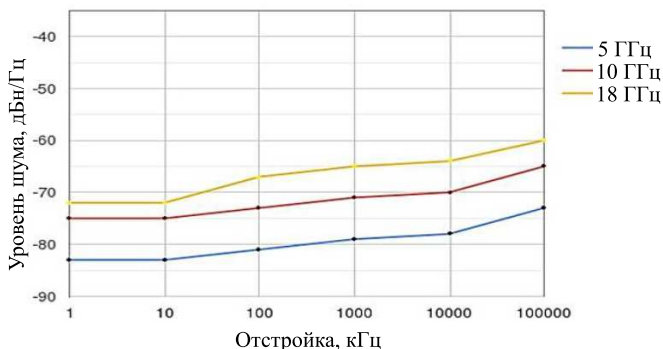


Рис. 3. Характеристика фазовых шумов широкополосного ГУНЦН с диапазоном частот СВЧ от 2 до 18 ГГц. Кривым на графике соответствуют следующие значения: синяя линия — 5 ГГц, красная линия — 10 ГГц, желтая линия — 18 ГГц

Анализ полученных результатов показывает, что, в отличие от аналоговых ГУН, в разработанной конструкции ГУНЦН уровень шумов на порядок ниже. Кроме того, уход частоты ГУНЦН в процессе работы от установленного номинального значения на 1 МГц не оказывает существенного влияния на шумовые характеристики во всем диапазоне перестраиваемых частот в отличие от аналоговых ГУН.

При перестройке длины волны излучения в передающей параболической антенне, в разработанной нами конструкции ГУНЦН, также появляется уход частоты. Характеристика подстройки ухода частоты в разработанном ГУНЦН приведена на рис. 4.

Анализ данных, представленных на рис. 4, показывает надежную работу автоматической подстройки частоты F . Максимальный уход частоты F в интервале 100 мс составляет менее 2.2 МГц, что характе-

Уход частоты после настройки, МГц

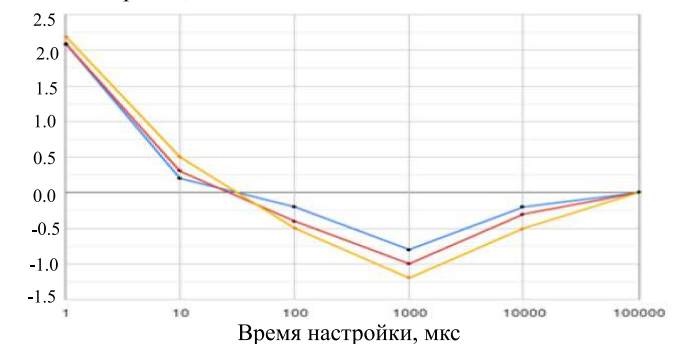


Рис. 4. Зависимость ухода посленастроечной частоты генератора от времени. Кривым на графике соответствуют следующие значения: синяя линия — 5 ГГц, красная линия — 10 ГГц, желтая линия — 18 ГГц

ризует высокую стабильность работы разработанного ГУНЦН. В таком случае можно получить более точные данные о составе радиационных облаков, которые в ряде случаев перемещаются с большой скоростью (скорость ветра), а также информацию о малогабаритных высокоскоростных подвижных объектах.

В таблице представлены результаты сравнения разработанного нами ГУНЦН с конструкциями лучших промышленных ГУНов с цифровой настройкой (компания Planar Monolithics Industries), работающих в широкой полосе частот. Для разработанного нами ГУНЦН были дополнительно измерены ряд параметров, которые представлены в таблице.

Анализ характеристик разработанного ГУН с цифровой настройкой с другими моделями ГУН показывает, что характеристики разработанного нами ГУНЦН в широкой полосе частот не уступают лучшим в мире ГУН с цифровой настройкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование в разработанной нами конструкции ГУНЦН линейризованной фазовой модуляции позволило на 20 дБн/Гц и более уменьшить фазовые шу-

мы при отстройке частоты СВЧ излучения, например на 100 кГц, при длительной работе РЛС-генератора. Необходимо отметить, что использование разработанного нами ГУНЦН в РЛС позволяет существенно сократить время измерения частоты излучателя на параболоиде до 80 нс и настроить излучающую систему РЛС на параболоиде по выходной частоте ГУНЦН за время 250 нс. Ранее для такой настройки требовалось

время более 10 мкс.

Расширения диапазона частот РЛС без уменьшения мощности излучаемого сигнала СВЧ при использовании разработанного нами ГУНЦН позволит более эффективно контролировать радиационную обстановку в атмосфере и определить степень опасности плазмы на основе данных о составе и концентрации в нем радионуклидных изотопов.

-
- [1] *Mazing M.S., Zaitceva A.Y., Kislyakov Y.Y.* // International Journal of Pharmaceutical Research. **12**, 1974. December 2020.
- [2] *Davydov R., Antonov V., Moroz A.* // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). Saint-Petersburg. **8906791**, 295. September 2019.
- [3] *Ponomareva O., Nepomnyashchaya E., Velichko E.* et al. // Spectroscopic Method for Studying the Characteristics of Human Skin. Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2021, **2021**. 244. October 2021.
- [4] *Bobyl A., Malyshkin V., Dolzhenko V.* et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, **390**, N 1 012047. November 2019.
- [5] *Davydov V.V.* // Measurement Techniques. **622** 1090. October 2020.
- [6] *Grevtseva A.S., Smirnov K.J., Greshnevnikov K. V.* et al. // Journal of Physics: Conference Series, **1368**, N 2. 022072, December 2018.
- [7] *Grebenikova N.M., Smirnov K.J.* // Journal of Physics: Conference Series, **1368**, N 2. 022057. December 2019.
- [8] *Gryznova E., Batov Y., Myazin N.* // E3S Web of Conferences. **140**. 09001. December 2019.
- [9] *Marusina M.Y., Fedorov A.V., Prokhorovich V.E.* et al. // Measurement Techniques. **61**, N 3. 297. May 2018.
- [10] *Davydov V.V., Dudkin V.I., Karseev A.Yu.* // Measurement Techniques. **57**, N 8. 912. November 2014.
- [11] *Karseev A., Vologdin V.* // Journal of Physics: Conference Series. **643**, N 1. 012108, September 2015.
- [12] *Fokin G.* // ICACT-2020. Pyeongchang. **9061461**. 1193. February, 2020.
- [13] *Davydov V., Fadeenko V., Fadeenko I., Popovskiy N., Rud V.* et al. // E3S Web of Conferences. **140**. 07006. December, 2019.
- [14] *Elokhin A.P., Ulin S.E., Vasilenko A.A.* // Atomic Energy. **130**, N 6. 360 (2021).
- [15] *Elokhin A.P.* // Atomic Energy. **117**, N 3. 206 (2015).
- [16] *Makeev S.S., Grevtzeva A.S., Glinushkin A.P., Matorin D.N.* // Journal of Physics: Conference Series, **1695**, N 1. 012112. December 2020.
- [17] *Elokhin A.P., Zhilina M.V.* // Atomic Energy, **112**, N 4. 269 May 2012.
- [18] *Fadeenko V.B., Fadeenko I.V., Vasiliev D.A., Rud V.Yu.* // Journal of Physics: Conference Series, **1697**, N 1. 012057. December 2020.
- [19] *Fadeenko V.B., Fadeenko I.V., Vasiliev D.A., Rud V.Yu.* // Journal of Physics: Conference Series, **1745**, N 1. 012023. December 2021.
- [20] *Fokin G., Lazarev V.* // Proceedings of the International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. **8970939**. 36 (2019).
- [21] *Kireev A., Fokin G., Al-Odhari A.H.A.* // Proceedings of the 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. **2018**. 1 (2013).
- [22] *Daniil V., Ekaterina K., Alexander S., Sergei B.,* // Springer Proceedings in Physics. **255**. 747 (2021).
- [23] *Gelgor A., Pavlenko L., Fokin G.* et al. // LTE base stations localization. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **8638 LNCS**. 191 September 2014.
- [24] *Cherepanov A.S., Sochava A.A., Golovkov A.A.* // In Proceedings of 2018 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region, PTES 2018. **8604236**. 153. November 2018.
- [25] *Myazin N.S., Smirnov K.J., Logunov S.J.* // Journal of Physics: Conference Series. **929**, N 1. 012080. (2017).
- [26] *Browne J.* // Microwaves and RF. **57**, N 3. 60 (2018).
- [27] *Browne J.* // Microwaves and RF. **55**, N 6. 86. (2016).
- [28] *Browne J.,* // Microwaves and RF. **55**, N 2. 66. (2016).
- [29] *Brunetti G., Marocco M., Armenise C.,* High-performance chirped microwave generator for space applications. In Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. **11852**. 118522V. (2021).

The development of a voltage-controlled generator with digital tuning for a multifunctional radar station

D.A. Ryzhova^a, V.B. Fadeenko^b

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University
St.Petersburg, 195251, Russia
E-mail: ^aqwdarya1234@gmail.com, ^bv21.07.96@mail.ru

The necessity of multifunctional radar station development for solving various tasks, including environmental monitoring, is substantiated. The necessity has been established for solving several tasks, including environmental

monitoring of air spaces, scanning the emitted microwave signal frequency in the range from 2 to 18 GHz, with a tuning step of 10 MHz. The emerging radar station problems during the implementation of this range are considered. The disadvantages of analog voltage-controlled generators (VCG), which are used in radar stations to synthesize a grid of microwave frequencies in the range of several GHz, are considered. A digital tuning VCG design has been developed on the domestic component base to implement the synthesis of a microwave frequency grid in the range from 2 to 18 GHz. The main characteristics of the developed VCG are investigated and compared with similar developments of the world's leading manufacturer (Planar Monolithics Industries). The effectiveness of radar station with a developed VCG usage for solving various tasks is shown.

PACS: 84.30.Ng.

Keywords: multifunctional radar station, radiation control, voltage-controlled generator, digital tuning, wavelength, SHF signal, signal-to-noise ratio

Received 31 May 2023.

Сведения об авторах

1. Рыжова Дарья Александровна — студент; e-mail: qwdarya1234@gmail.com.
2. Фадеенко Варвара Борисовна — аспирант; e-mail: v21.07.96@mail.ru.