

УДК 621.396.67

Низкопрофильная антенна с изменяемой диаграммой направленности

Лянгузов Д. А.

Постановка задачи: для обеспечения связи с летательными аппаратами одно из основных требований к характеристике антенного устройства есть круговая диаграмма направленности, либо возможность управления её формой для «сопровождения» движущегося объекта. К средству специальной радиосвязи, как к объекту системы управления в целом, предъявляется требование минимума демаскирующих признаков. Характеристики существующих антенных устройств не в полной мере соответствуют требованию по наличию круговой диаграммы направленности вследствие наличия искажений, обусловленных дифракцией радиоволн на углах корпуса объекта, а внешний вид существующих антенн является демаскирующим признаком. **Целью работы** является разработка малозаметной низкопрофильной антенны с круговой и (или) с управляемой диаграммой направленности, применение которой повышает помехоустойчивость радиоканала за счёт более эффективного использования энергетического ресурса, по сравнению с существующими антеннами, а также увеличивает мобильность станции за счёт сокращения габаритных размеров подвижного объекта радиосвязи. **Используемые методы:** решение задачи определения электрических характеристик направленности разрабатываемой антенны основано на применении двух численных методов электродинамики: метода конечных элементов и метода конечных разностей во временной области. Проведены натурные измерения характеристик антенны на изготовленном масштабном прототипе. В качестве критерия применимости антенны выбраны форма диаграммы направленности в дальней зоне и значения коэффициента стоячей волны для метровых волн. Управляемыми параметрами антенны являлись положение точки питания и расстояние между емкостными вставками. **Новизна:** элементом новизны предлагаемой антенны является наличие ёмкостных вставок между излучающими элементами антенны и корпусом объекта, представляющими собой сосредоточенную ёмкость. Данная конструктивная особенность позволяет компенсировать искажения формы диаграммы направленности, обусловленные «затеканием» токов проводимости на корпус объекта, на котором расположена антенна, и управлять направленностью антенны с помощью изменения положения точки питания. **Результат:** рассчитанные с помощью численных методов значения коэффициента стоячей волны и характеристики направленности антенны позволяют использовать представленное решение для компенсации искажения диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости, а также демонстрируют возможность управления характеристикой направленности излучателя, что позволяет повысить энергетическую эффективность и, как следствие, помехоустойчивость радиоканала в движении. **Практическая значимость:** представленную конструкцию предлагается реализовать в виде крышевого антенного устройства на радиостанции специального назначения вместо существующих УКВ-антенн. Такая конструкция является низкопрофильной, механически прочной, также она не выступает за пределы корпуса транспортной базы, что повышает скрытность объекта.

Ключевые слова: полосковая антенна, численные методы электродинамики, управление электрическими характеристиками антенн, подвижный объект.

Библиографическая ссылка на статью:

Лянгузов Д. А. Низкопрофильная антенна с изменяемой диаграммой направленности // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 80-91. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-80-91

Reference for citation:

Lyanguzov D. A. Low Profile Variable Beam Antenna. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 80-91 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-2-80-91

Актуальность

Современные средства и комплексы подвижной радиосвязи могут оснащаться различными по диапазонам рабочих частот, мощности и конструкции излучающими радиосредствами. Работа с летательными аппаратами (ЛА), в том числе с беспилотными (БПЛА) подразумевает наличие устойчивого радиоканала для организации взаимодействия (для БПЛА – управления). В случае, если радиосредство движется и принимает произвольное положение относительно ЛА, одним из вариантов размещения антенны является крыша кузова аппаратной связи. На подвижных объектах радиосвязи для обеспечения связи в коротковолновом (КВ) и ультракоротковолновом (УКВ) диапазонах широкое распространение получили следующие крышевые антенны: малогабаритные симметричные и несимметричные вибраторы (в том числе при работе с ЛА в движении), рамочные ферритовые антенны, антенны зенитного излучения или приема и т.п. В ряде случаев применяются щелевые и полосковые антенны [1-6]. Совместно с ними располагаются климатические системы и монтажное оборудование, что вкуче с геометрической формой корпуса является причиной дифракции на углах и, как следствие, искажения характеристики направленности антенн, в особенности вертикальных несимметричных вибраторов (НСВ) [7]. В статье предлагается вариант применения полосковой антенны в составе комплексной аппаратной связи специального назначения для организации радиосвязи с ЛА на стоянке и в движении, с компенсацией искажений диаграммы направленности. Применение указанной антенны повысит энергетическую эффективность и скрытность объекта радиосвязи, по сравнению с существующими антенными устройствами, входящими в состав радиостанций специального назначения. Так, вертикальные НСВ имеют высоту несколько метров, что затрудняет перемещение радиостанции в сложных физико-географических условиях. Антенны зенитного излучения значительно выступают за пределы корпуса, а рамочные ферритовые антенны в силу конструктивных особенностей невозможно использовать только на приём.

Полосковые антенны известны достаточно давно [8], но широкое распространение получили небольшие антенны в сантиметровых волнах вследствие линейной зависимости размеров антенн от длины волны. Однако площади крыши подвижных объектов как правило достаточно для размещения полосковой антенны метровых волн, а небольшая высота (несколько сантиметров) незначительно увеличивает высоту объекта.

Несмотря на известную узкополосность, низкопрофильная полосковая антенна, представленная в статье, позволяет обеспечить слабонаправленное излучение в горизонтальной плоскости в УКВ-диапазоне частот, а при изменении положения точки питания – управление направлением излучения. При движении аппаратной такая антенна, в отличие от НСВ, не подвержена влиянию контактной сети, не выступает за габариты корпуса объекта, повышая его скрытность, устойчива к механическому воздействию, что совместно с отсутствием временных затрат на развертывание является перспективным при применении в составе аппаратной связи такого типа.

Конструкция и принцип работы антенны

Антенна представляет собой конструкцию из металлического листа, расположенного на малом расстоянии над крышей корпуса радиостанции, параллельно ей. Отличительной особенностью конструкции является наличие на каждой кромке листа по центру четырех металлических пластин, соединенных с листом гальванически. Параллельно им на крыше радиостанции установлены ещё четыре пластины так, что в паре с пластинами, закрепленными на листе они представляют собой емкостную нагрузку (четыре отдельных согласующих элемента). Полость между листом и крышей заполнена диэлектриком. Питание осуществляется коаксиальным фидером, проходящим сквозь слой диэлектрика и гальванически соединенным с металлическим листом антенны.

Антенна может быть изготовлена из листа меди, размерами 2,5×0,9×0,01 м и установлена на диэлектрическую подложку из полистирола с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=2$. На рис. 1-3 представлена геометрическая конструкция антенны со значениями ряда параметров, указанных в таблице 1. Для возбуждения используется коаксиальный фидер с волновым сопротивлением 50 Ом. Для указанной антенны некоторые из параметров, общие для полосковых антенн, (1) определены согласно рекомендациям [9, 10]:

$$L \approx 0,49 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}; \quad \frac{W}{L} \approx 2,7; \quad (1)$$

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Значения геометрических параметров полосковой антенны

| Параметр | Значение (м) | Параметр | Значение (м) |
|----------|--------------|----------|--------------|
| <i>a</i> | 0,01 | <i>h</i> | 0,2 |
| <i>b</i> | 0,5 | <i>W</i> | 2,5 |
| <i>c</i> | 0,16 | <i>L</i> | 0,9 |
| <i>d</i> | 0,03-0,1 | | |

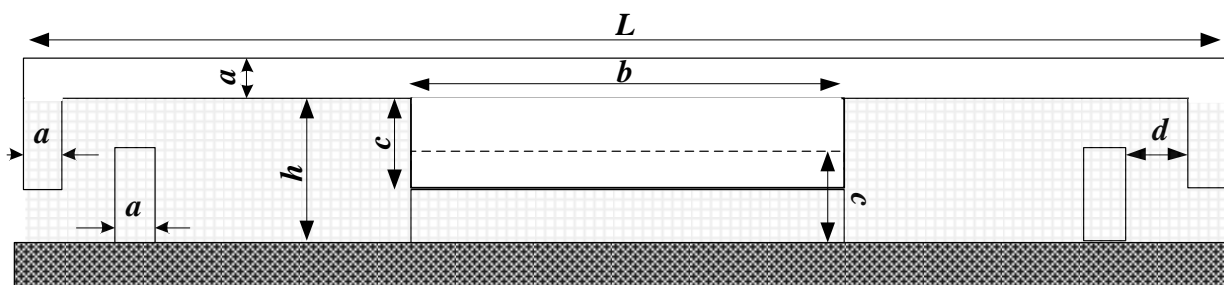


Рис. 1. Конструкция антенны, вид сбоку

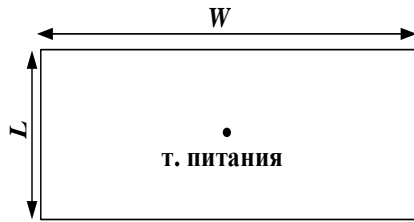


Рис. 2. Конструкция антенны, вид сверху

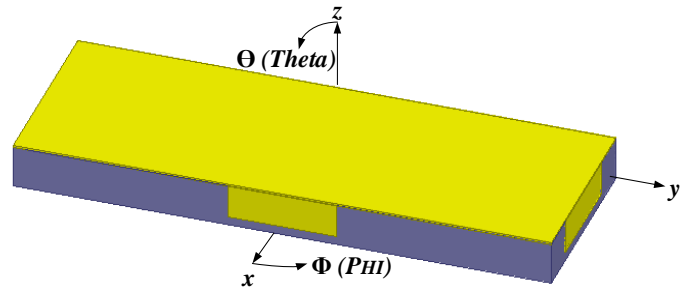


Рис. 3. 3D-модель разрабатываемой антенны

Электрические характеристики предлагаемой антенны были рассчитаны независимо с использованием метода конечных разностей во временной области (МКРВО) и метода конечных элементов (МКЭ).

Принцип действия антенны основан на резонансе моды TM в слое диэлектрика, позволяющего увеличить электрическую длину антенны в $\sqrt{\epsilon_r}$ раз. Электрический ток поступает из коаксиального фидера, соединенного с металлическим листом. Заряды распределяются по плоскому проводнику, концентрируясь на краях листа. С определенными допущениями, в слое диэлектрика между кромкой и металлической подстилающей поверхностью формируются четыре эквивалентные щелевые антенны, суммарное излучение которых формирует результирующую характеристику направленности. Металлические вставки, расположенные на каждой стороне антенны, вносят неравномерность в распределение электрических зарядов на металлическом листе таким образом, чтобы обеспечить выравнивание диаграммы направленности и обеспечить согласование с линией питания (пары пластин представляют собой ёмкостную нагрузку).

Электрическое поле возбуждается в зазорах вдоль коротких сторон антенны, что может рассматриваться как сонаправленное протекание эквивалентного магнитного тока вдоль каждой из этих сторон и, как следствие, происходит излучение электромагнитной волны в соответствующих направлениях. Кроссполаризационное излучение обусловлено протеканием эквивалентного магнитного тока по длинным сторонам антенны. Распределение магнитных токов в полосковом излучателе изображено на рис. 4.

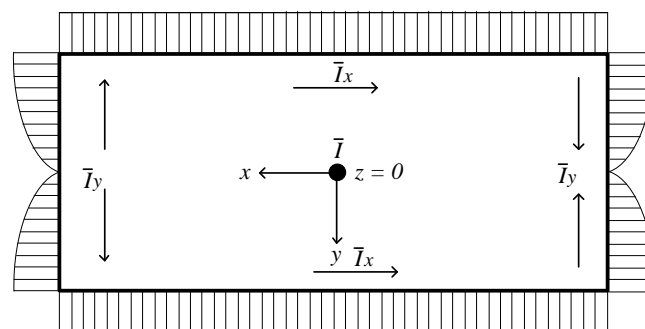


Рис. 4. Распределение магнитных токов в эквивалентных щелевых излучателях

Результаты и обсуждение

Результаты расчета модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ для различных значений параметра d с использованием МКЭ и МКРВО представлены на рис. 5, 6 соответственно. Частотные зависимости $|\Gamma|$, полученные обоими методами, имеют схожую форму, что свидетельствует о правильном построении модели. При изменении d от 0,04 м до 0,08 м с шагом 0,01 м $|\Gamma|$ достигает приемлемого значения минус 10 дБ в полосе частот порядка 13 МГц (коэффициент перекрытия $K_f=1,08\%$).

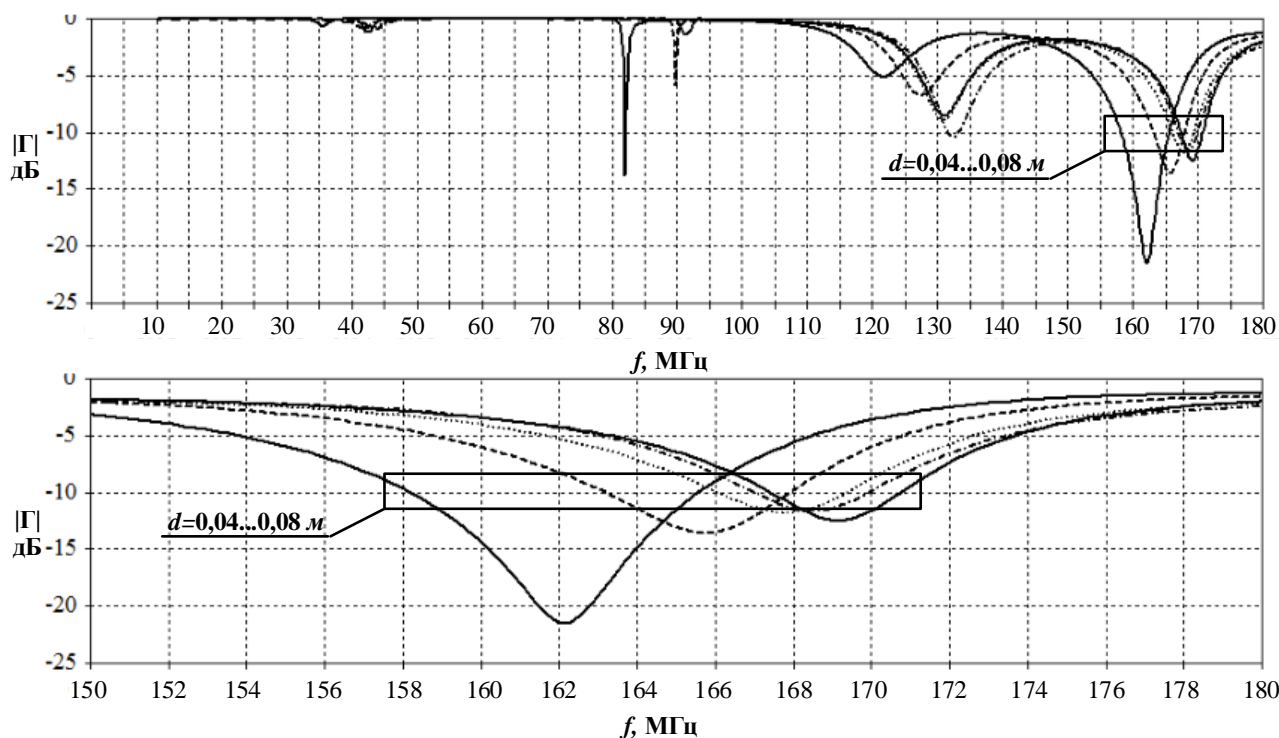


Рис. 5. Частотные зависимости $|\Gamma|$, полученные МКЭ для $d=0,04\dots0,08$ м

На рис. 7 представлены значения $|\Gamma|$ для вертикального НСВ высотой 1,81 м, расположенного на крыше радиостанции специального назначения. Ширина полосы частот по уровню коэффициента отражения -10 дБ составляет 5 МГц, что в 2,6 раза меньше, чем у предлагаемой антенны с различными вариантами исполнения расстояния между ёмкостными вставками. Расширение рабочей полосы частот возможно за счёт увеличения толщины сечения НСВ с 1 см до 4 см, что является нецелесообразным из-за значительного увеличения веса и снижения гибкости металлической конструкции. Однако даже для такого НСВ диаграмма направленности будет искажена вследствие дифракции радиоволн на корпусе радиостанции. В общем случае, приемлемого значения $|\Gamma|$ на определённых частотах можно добиться с помощью согласующего устройства, конструкция которого выбирается исходя из частных условий применения антенны. Для предлагаемой антенны требования к согласующему устройству значительно ниже, чем для НСВ благодаря большей ширине полосы частот по приемлемому значению $|\Gamma|$.

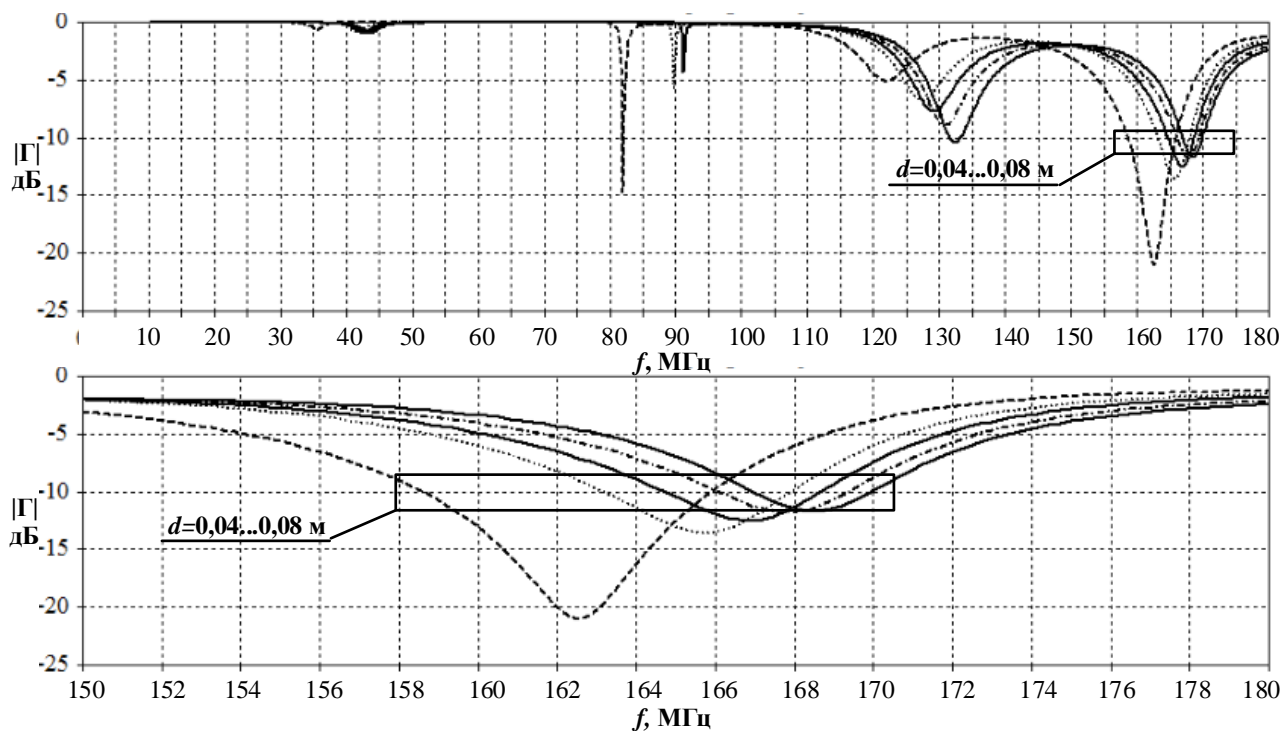


Рис. 6. Частотные зависимости $|\Gamma|$, полученные МКРВО для $d=0,04\dots0,08$ м

На рис. 8, 10 представлены результаты моделирования ДН антенны при $d=0,04; 0,05; 0,06$ м для центральной (ЦТП) и смещенной (СТП) точек питания соответственно.

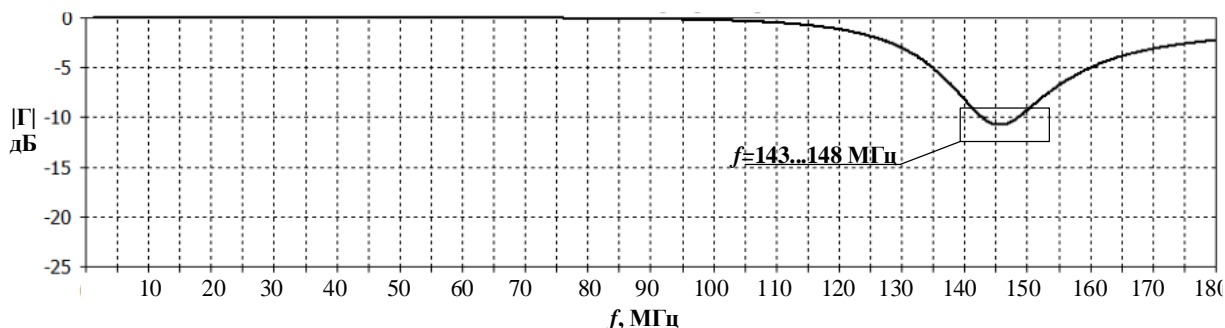


Рис. 7. Частотная зависимость $|\Gamma|$ вертикального НСВ

Расчет распределения тока на поверхности антенны при ЦТП и СТП МКРВО изображен на рис. 9, 11. Из-за симметричного распределения тока по поверхности антенны (рис. 9) для высоких углов места (УМ) формируется круговая ДН (рис. 8 б), что позволяет организовать радиосвязь с ЛА в движении и на коротких остановках, а также в случае, если его положение заранее неизвестно. При необходимости установления связи со значительно удаленным ЛА в условиях воздействия направленных помех возможно создание направленных свойств антенны – при ЦТП на низких УМ (рис. 8 а), а с помощью изменения позиции точки питания коммутацией представляется возможным дискретно управлять главным лепестком излучения, отстраиваясь от помех, сопровождая ЛА в воздухе (рис. 10 а,б).

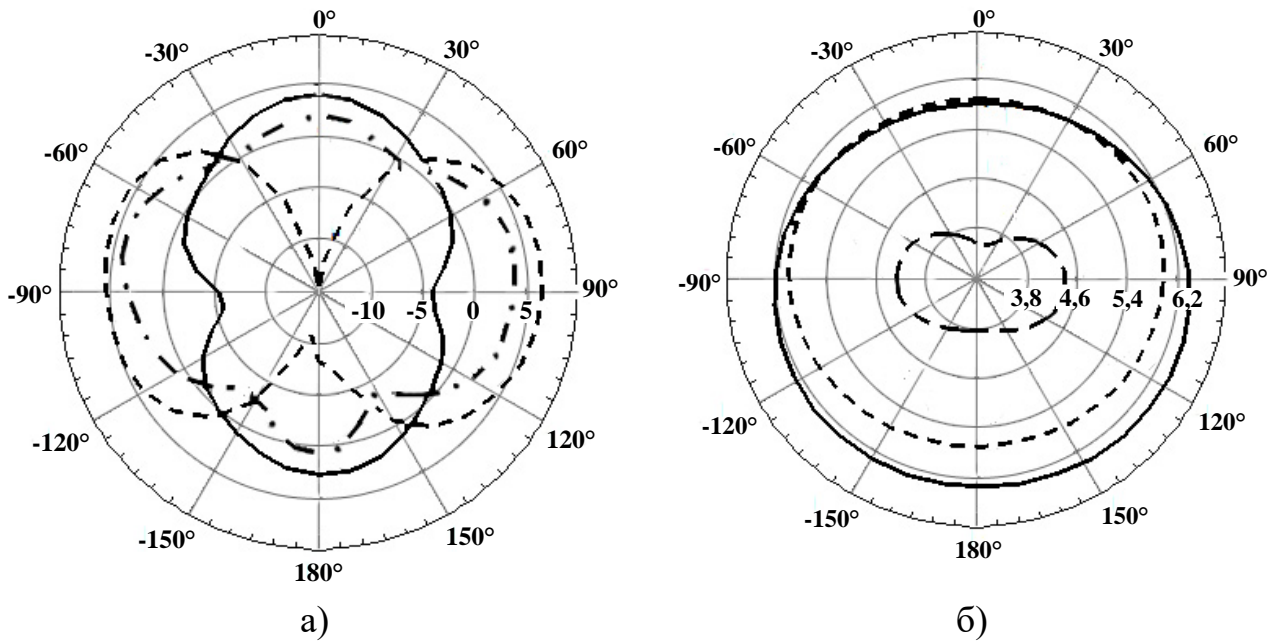


Рис. 8. Результаты моделирования диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости на частоте $f=163$ МГц, для $\theta=80^\circ$ (а) и для $\theta=10^\circ$ (б) при центральной точке питания, в дБ. Сплошная линия – $d=0,04$ м, пунктирная линия – $d=0,06$ м, штрихпунктирная линия – $d=0,05$ м

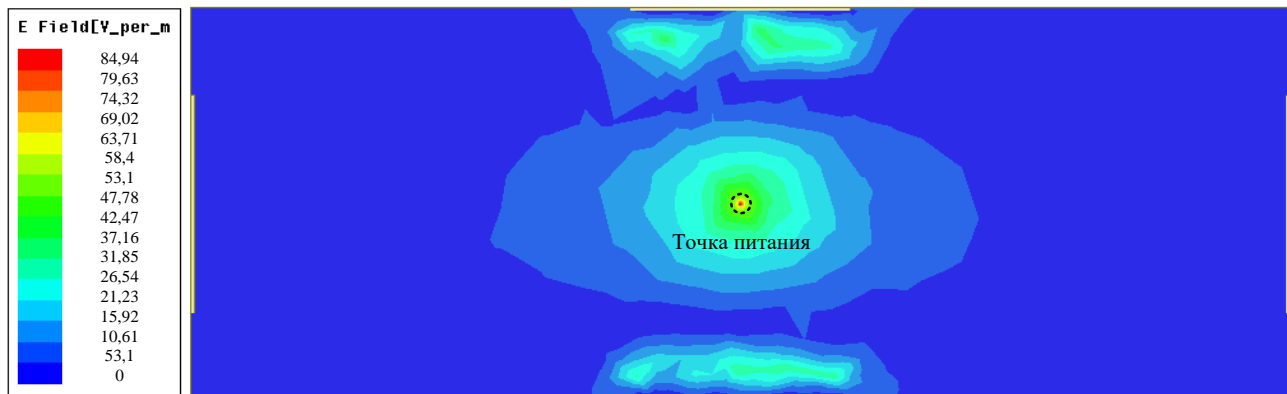


Рис. 9. Распределение вектора напряженности электрического поля на поверхности антенны при центральной точке питания

Для проверки достоверности полученных результатов был изготовлен масштабный прототип антенны с ЦТП. Его геометрические размеры указаны на рис. 12. Измерение распределения поля в дальней зоне проводилось по методике [11]. Шаг измерения ДН составлял 1 градус. Сравнение результатов моделирования и измерения представлено на рис. 13. Наличие погрешности обусловлено, в том числе, несовершенством области точки питания прототипа.

Анализ характеристик направленности антенны позволяет сделать вывод о возможности применения предлагаемой полосковой антенны на подвижном объекте радиосвязи. В зависимости от расположения точки возбуждения распределение токов на поверхности полосковой антенны и, как следствие,

направленные свойства изменяются. Результаты моделирования направленных свойств антенны для различных вариантов размещения точки питания представлены на рис. 9 и рис. 11.

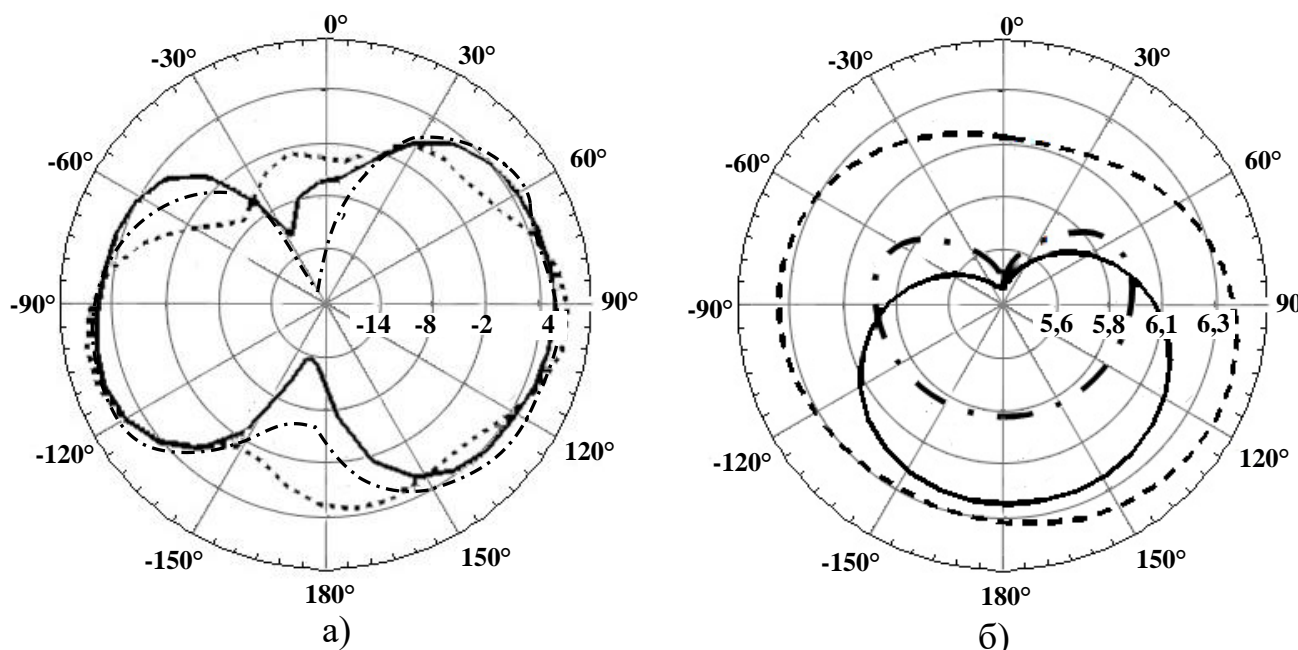


Рис. 10. Результаты моделирования диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости на частоте $f=163$ МГц, для $\theta=80^\circ$ (а) и для $\theta=10^\circ$ (б) при смещенной точке питания, в дБ. Сплошная линия – $d=0,04$ м, пунктирная линия – $d=0,06$ м, штрихпунктирная линия – $d=0,05$ м.

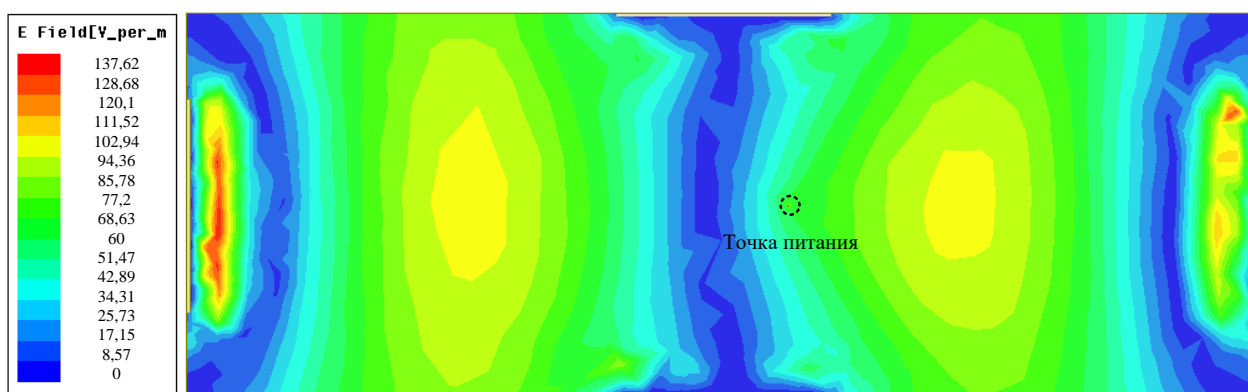


Рис. 11. Распределение вектора напряженности электрического поля на поверхности антенны при смещенной точке питания

Таким образом, с помощью оперативной коммутации возбуждающих токов представляется возможным управление характеристиками направленности полосковой антенны, расположенной на подвижном объекте для сопровождения ЛА в воздухе.

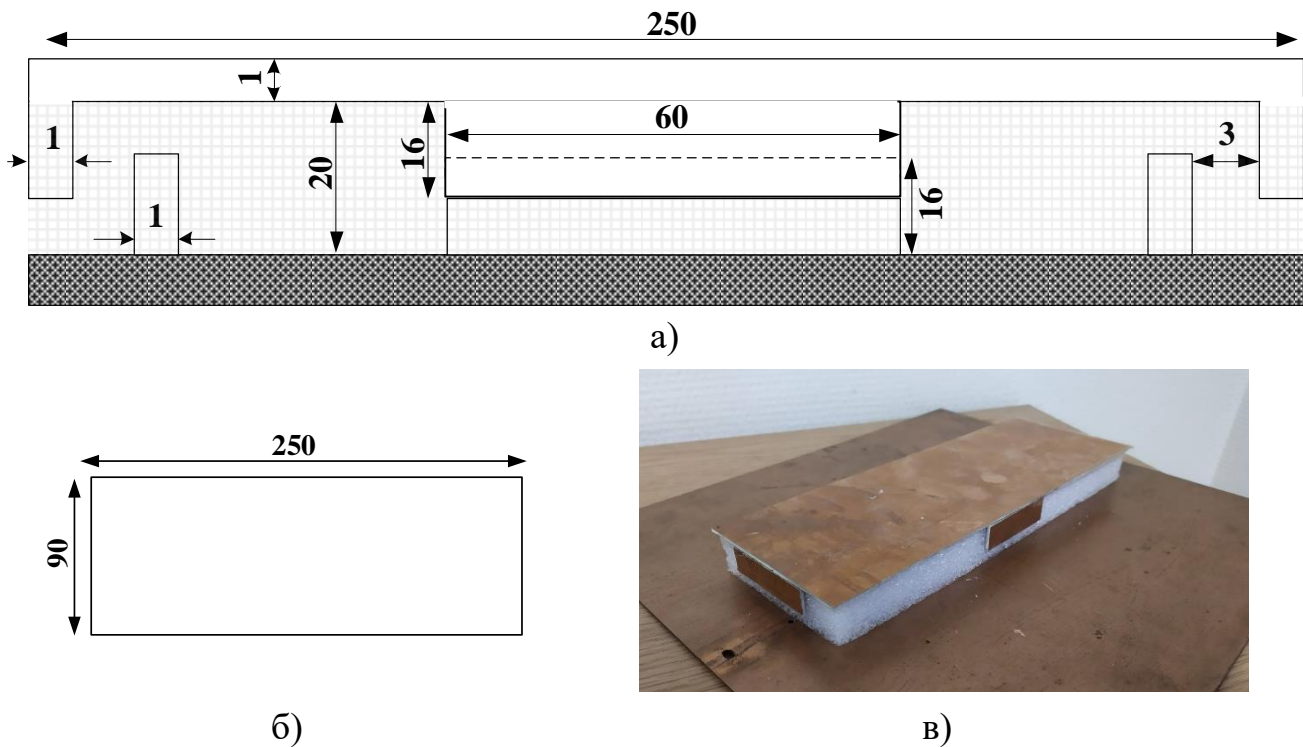


Рис. 12. Геометрические размеры (мм) поперечного сечения (а) и габаритов (б) прототипа антенны и фото его макета (в)

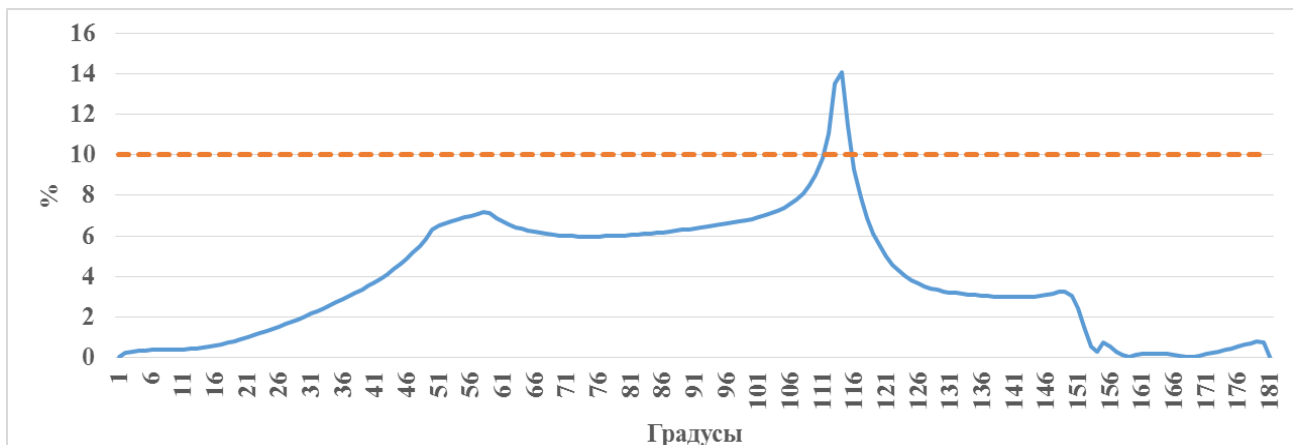


Рис. 13. Относительная погрешность измерения и моделирования ДН

Выводы

1. Разработана малозаметная низкопрофильная полосковая антенна для подвижных объектов радиосвязи специального назначения. Применение сосредоточенной емкости позволило управлять диаграммой направленности: формировать круговую (для центральной точки питания) и направленную (в сторону отклонения положения точки питания от центра конструкции) и компенсировать дифракцию на углах корпуса объекта.

2. Определение электрических характеристик выполнено с использованием МКРВО и МКЭ, получены схожие результаты. Изготовлен масштабный прототип для исследования характеристик направленности частного варианта конструкции антенны. Результаты, полученные в ходе измерений, близки к ре-

результатам, полученным с помощью компьютерного моделирования, что свидетельствует о высокой достоверности результатов исследования.

3. Исследованные характеристики полосковой антенны полезны при планировании применения средств радиосвязи специального назначения.

4. Полосковая антенна может быть расположена на крыше радиостанции, является низкопрофильной и малозаметной, не выступает за пределы корпуса радиостанции. В результате подвижный объект радиосвязи визуально слабо отличается от транспортных средств специального назначения, что значительно повышает скрытность объекта.

5. Наличие зазора между ёмкостными вставками, реализация нескольких точек возбуждения и оперативная коммутация питающих токов с помощью решающего устройства в зависимости от положения ЛА в воздухе позволяет формировать направленность полосковой антенны. Это определяет энергетический выигрыш при использовании данной конструкции в движении и на коротких остановках.

Литература

1. Бородулин Р. Ю., Лукьянов Н. О. Постановка поглощающих граничных условий Мура первого порядка точности для решения задач электродинамики методом конечных разностей во временной области // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 8. С. 57-68.

2. Коробков Е. С., Лянгузов Д. А., Снежко В. К., Якушенко С. А. Модель оценки пригодности радиорелейного интервала при организации связи в движении // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 12-16.

3. Khalifa M. O., Yacoub A. M., Aloji D. N. A multi-wideband compact antenna design for vehicular sub-6GHz 5G wireless systems // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021. Vol. 69. № 12. P. 8136-8142.

4. Prinsloo D. S., Glazunov A. A., Maaskant R., Ivashina M. V., Kukush V., Meyer P. Characterization and performance of an ultra-wideband wide-coverage multimode MIMO antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67. № 9. P. 5812-5823.

5. Yijing He, Yue Li. Dual-polarized microstrip antennas with capacitive via fence for wide beamwidth and high isolation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2020. Vol. 67. № 7. P. 5095-5103.

6. Diez M. B., Plitt P., Pascher W., Lindenmeier S. Antenna placement and wave propagation for car-to-car communication // Proceedings of the 45th European Microwave Conference. – Paris, 2015. – P. 207-210.

7. Лянгузов Д. А. Интеллектуальное изменение характеристик направленности антенны, расположенной на подвижном объекте радиосвязи с учетом пассивных компенсирующих элементов // Применение искусственного интеллекта в информационно-телекоммуникационных системах. – СПб., 2021. С. 152-156.

8. Федянович В. И., Дутиков М. Д. Маловыступающая конформная полосковая антенна // Патент на изобретение SU 696926 A1, опубл. 27.06.1999.

9. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. – Wiley, 2016. – 1095 p.

10. Lee F., Chen W. Advances in microstrip and printed antennas. – Wiley, 1997. – 599 p.

11. Методы измерений характеристик антенн СВЧ / под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радиосвязь, 1985. – 368 с.

References

1. Borodulin R. U., Lukianov N. O. Postanovka pogloshchaiushchikh granichnykh uslovii Mura pervogo poriadka tochnosti dlia resheniia zadach elektrodinamiki metodom konechnykh raznostei vo vremennoi oblasti [Statement of absorbing Moore boundary conditions of the first order of accuracy for solving problems of electrodynamics by the method of finite differences in the time domain]. *Radiotechnics*, 2021, vol. 85, no. 8, pp. 57-68 (in Russian).
2. Korobkov E. S., Lyanguzov D. A., Snezhko V. K., Iakushenko S. A. Model' otsenki prigodnosti radioreleynogo intervala pri organizatsii svyazi v dvizhenii [Model for evaluating the suitability of a microwave interval in motion]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2017, no. 12, pp. 12-16 (in Russian).
3. Khalifa M. O., Yacoub A. M., Aloji D. N. A multi-wideband compact antenna design for vehicular sub-6GHz 5G wireless systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 8136-8142.
4. Prinsloo D. S., Glazunov A. A., Maaskant R., Ivashina M. V., Kukush V., Meyer P. Characterization and performance of an ultra-wideband wide-coverage multimode MIMO antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, vol. 67, no. 9, pp. 5812-5823.
5. Yijing He, Yue Li. Dual-polarized microstrip antennas with capacitive via fence for wide beamwidth and high isolation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, vol. 67, no. 7, pp. 5095-5103.
6. Diez M. B., Plitt P., Pascher W., Lindenmeier S. Antenna placement and wave propagation for car-to-car communication. *Proceedings of the 45th European Microwave Conference*, Paris, 2015, pp. 207-210.
7. Lyanguzov D. A. Intellektual'noe izmenenie kharakteristik napravlenosti anteny, raspolozhennoi na podvizhnom ob"ekte radiosvyazi s uchetom passivnykh kompensiruiushchikh elementov [Intelligent change in the directivity characteristics of an antenna located on a mobile radio communication object, taking into account passive compensating elements]. *Primenenie iskusstvennogo intellekta v informatsionno-telekommunikatsionnykh sistemakh* [Application of artificial intelligence in information and telecommunication systems]. Sankt-Peterburg, 2021, pp. 152-156 (in Russian).
8. Fedianovich V. I., Dutikov M. D. Malovystupaiushchaia konformnaia poloskovaia antenna [Low protrusion conformal strip antenna]. Patent Russia, no. SU 696926 A1, 27.06.1999.
9. Balanis C. A. *Antenna theory: analysis and design*. Wiley, 2016. 1095 p.
10. Lee F., Chen W. *Advances in microstrip and printed antennas*. Wiley, 1997. 599 p.
11. Tseitlin N. M. *Metody izmerenii kharakteristik antenn SVCh* [Methods for measuring the characteristics of microwave antennas]. Moscow, 1985. 368 p. (in Russian).

Статья поступила 05 марта 2022 г.

Информация об авторе

Лянгузов Данила Андреевич – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адыюнкт кафедры радиосвязи. Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного. Область научных интересов: численные методы электродинамики, конструкционный синтез антенн. Тел.: +7 981 781 53 61. E-mail: danilalgz@ya.ru.

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

Low Profile Variable Beam Antenna

D. A. Lyanguzov

Purpose. To ensure communication with aircraft, one of the main requirements for the characteristics of an antenna device is a circular radiation pattern, or the ability to control its shape to "accompany" a moving object. A special radio communication facility, as an object of the control system as a whole, is required to have a minimum of unmasking features. The characteristics of existing antenna devices do not fully comply with the requirement for the presence of a circular radiation pattern due to the presence of distortions caused by the diffraction of radio waves at the corners of the body of the object, and the appearance of existing antennas is a unmasking sign. **The aim** of the work is the development of an inconspicuous low-profile antenna with a circular and (or) controllable radiation pattern, the use of which increases the noise immunity of the radio channel due to more efficient use of the energy resource, compared with existing antennas, and also increases the mobility of the station by reducing the overall dimensions of a mobile radio communication object. **Methods.** The solution of the problem of determining the electrical characteristics of the directivity of the developed antenna is based on the use of two numerical methods of electrodynamics: the finite element method and the finite difference method in the time domain. Field measurements of the characteristics of the antenna were carried out on a manufactured large-scale prototype. As a criterion for the applicability of the antenna, the shape of the radiation pattern in the far zone and the values of the standing wave coefficient for meter waves are chosen. The controlled parameters of the antenna were the position of the feed point and the distance between the capacitive inserts. **The element of novelty** of the proposed antenna is the presence of capacitive inserts between the radiating elements of the antenna and the body of the object, which are a concentrated capacitance. This design feature makes it possible to compensate for distortions in the shape of the radiation pattern caused by the "leakage" of conduction currents on the body of the object on which the antenna is located, and to control the directivity of the antenna by changing the position of the feed point. **Results.** The values of the standing wave coefficient and the directivity of the antenna calculated using numerical methods make it possible to use the presented solution to compensate for the distortion of the antenna radiation pattern in the horizontal plane, and also demonstrate the possibility of controlling the directivity of the radiator, which makes it possible to increase the energy efficiency and, as a result, noise immunity of the radio channel in motion. **Practical relevance.** The presented design is proposed to be implemented in the form of a rooftop antenna device at a special-purpose radio station instead of existing VHF antennas. This design is low-profile, mechanically strong, and it does not protrude beyond the body of the transport base, which increases the stealth of the object.

Keywords: strip antennas, numerical methods of electrodynamics, control of electrical characteristics of antennas, moving object.

Information about Author

Danila Andreevich Lyanguzov – Doctoral Student. The postgraduate student of the Department of Radio Communication. Military Communications Academy named after the Marshal of the Soviet Union S. M. Budenny. Research interests: numerical methods of electrodynamics, structural synthesis of antennas. E-mail: danilalgz@ya.ru.

Address: 194064, Russia, St. Petersburg, Tikhoretsky avenue, 3.