

# Перспективы использования жидкого металла для создания перестраиваемых и конформных антенн

Н.С. Медвехкв, В.С. Витушкин

ООО НПФ «ПРИМА»

**Аннотация:** в статье выполнен краткий обзор антенн, способных менять свои электрические параметры путем изменения геометрии составных частей – перестраиваемых антенн. Приводится классификация по типам антенн в зависимости от способа их перестроения. Рассматриваются антенны из жидкого металла, как перспективное направление развития перестраиваемых и конформных антенн. Приведены преимущества и недостатки антенн из жидкого металла и обозначены проблемы, решение которых, по мнению авторов, будет в дальнейшем способствовать развитию данного направления в антенной технике.

**Ключевые слова:** перестраиваемая антенна, реконфигурируемая антенна, подвижная антенна, конформная антенна, топология антенны, жидкий металл, антенна из жидкого металла

## 1. Введение

В связи с активным развитием различных радиоэлектронных систем, как гражданского, так и военного назначения, растет спрос на неотъемлемые составные части данных систем – антенны. Согласно аналитическому отчету «Military Antenna Market Size & Share 2025 – 2034» [1] среднегодовой темп роста рынка только антенн военного применения ожидается до 5,3%. Кроме того, к современным антеннам и антенным системам, для повышения эффективности и надежности радиотехнических комплексов, предъявляются высокие требования как в части электрических характеристик, так и по конструктивному исполнению.

Одним из таких требований является возможность изменения одной или нескольких электрических характеристик (диаграммы направленности, рабочей частоты, поляризации) в зависимости от условий эксплуатации и окружающей обстановки. Данное требование можно удовлетворить двумя способами:

- изменением пространственного положения антенны в целом;
- изменением формы и расположения отдельных элементов антенны, таких как отражатель (рефлектор), вторичный излучатель (директор) или непосредственно сам резонирующий элемент (вibrator).

Другим требованием является высокая степень интеграции в готовую конструкцию объекта. Особенно это актуально для транспортных средств, перемещающихся с высокой скоростью, для которых важно сохранение аэродинамических свойств, и для объектов, малозаметных в радиодиапазоне за счет низкой эффективной площади рассеяния (ЭПР). Данное требование можно выполнить за счет особой конструкции или свойств (например, механической гибкости) антенны, позволяющей повторить форму поверхности объекта.

Таким образом, наиболее перспективными с точки зрения электрических требований являются антенны, способные в том или ином виде изменять собственную геометрию корректируя сразу несколько характеристик - перестраиваемые антенны, а с целью выполнения требований по интеграции наибольшим потенциалом обладают антенны, изготовленные из гибких материалов.

## 2. Перестраиваемые антенны

Авторы исследования [2] предлагают классифицировать перестраиваемые антенны на подвижные антенны (Movable antennas, MAs) и реконфигурируемые антенны (Reconfigurable antennas, RAs).

### Подвижные антенны

Подвижными называют антенны, которые могут менять свое строение и ориентацию механическим способом, например, перемещать антенну в различных плоскостях и вращать с помощью системы приводов и направляющих, как показано на рисунке 1 [2].

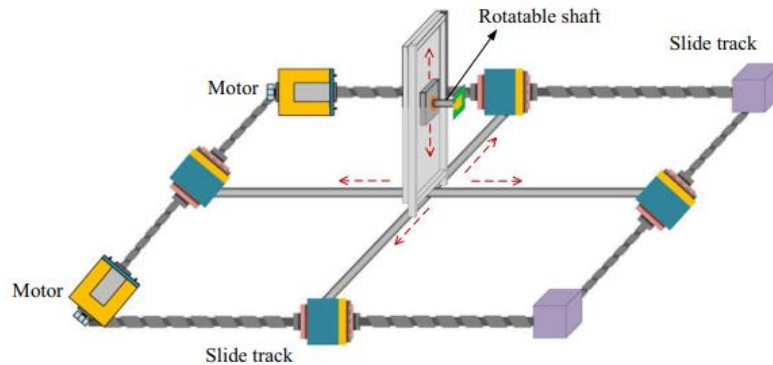


Рисунок 1. Механический метод перестроения антенны.

### Реконфигурируемые антенны

Реконфигурируемыми называют антенны, которые могут изменять свои параметры электронным способом. По данным исследований [2], распространенным методом, совместимым с цифровым управлением, является использование переключателей (pin-диоды, микроэлектромеханические системы) для коммутации необходимых рабочих элементов антенны, как показано на рисунке 2(а). Не потерял актуальности и метод аналогового управления, с использованием, например, варакторов (рисунок 2(б)).

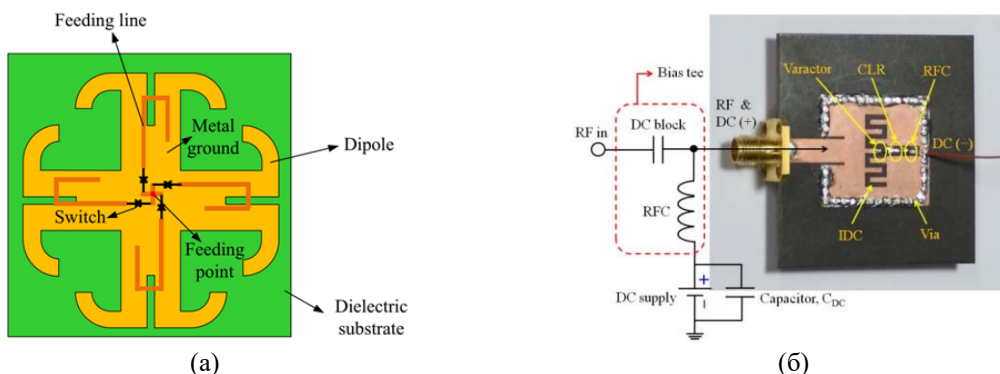
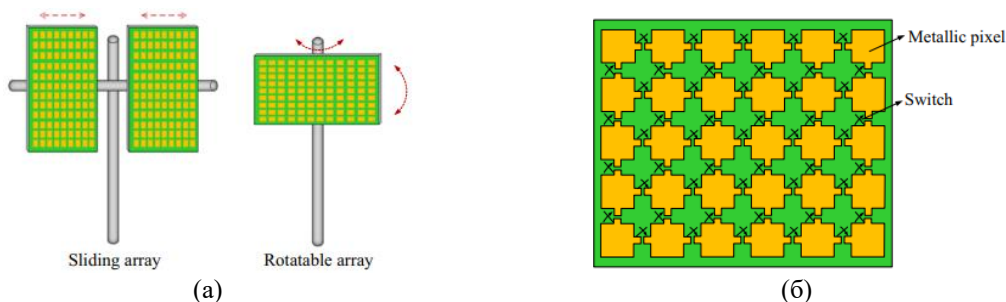


Рисунок 2. Реконфигурируемые антенны: (а) – с коммутацией вибраторов, (б) – с использованием варактора.

Возможно применение гибридного метода, сочетающего в себе механический и электронные методы. Например, как показано на рисунке 3, механический метод позволит регулировать общее направление антенны, а электронный – формировать и направлять луч или поляризацию.



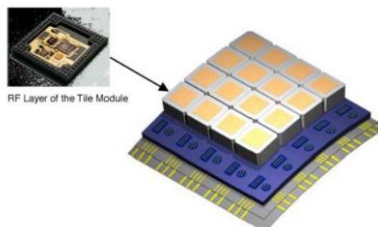
**Рисунок 3.** Гибридная перестраиваемая антенна: (а) – изменение направления, (б) – коммутация элементов для формирования луча.

### 3. Конформные антенны

На больших объектах антенну легче интегрировать в корпус при сохранении формы объекта и отсутствии выпирающих частей. На судне Zumwalt class vessel (рисунок 4) используются модульные сборки из плоских панелей, которые встроены в общую конструкцию судна [3]. Рисунок 5 демонстрирует пример концепции построения блочной фазированной антенной решетки, устанавливаемой на суда и другие крупные объекты. Такую антенну можно назвать конформной, но только в пропорции с носителем.

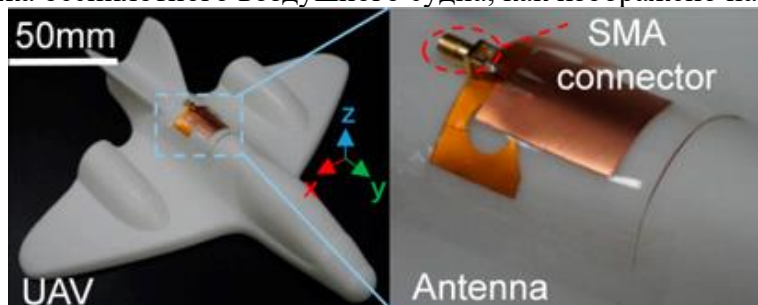


**Рисунок 4.** Интеграция конформных антенн в корпус судна Zumwalt class vessel.



**Рисунок 5.** Фазированная антенная решетка с базовыми приемопередающими модулями.

Для малоразмерных высокоскоростных объектов обтекаемой формы, имеющих минимальное количество прямоугольных плоских форм, блочная конструкция не применима. В таких случаях используют конформную антенну, которая повторяет форму фюзеляжа беспилотного воздушного судна, как изображено на рисунке 6 [4].

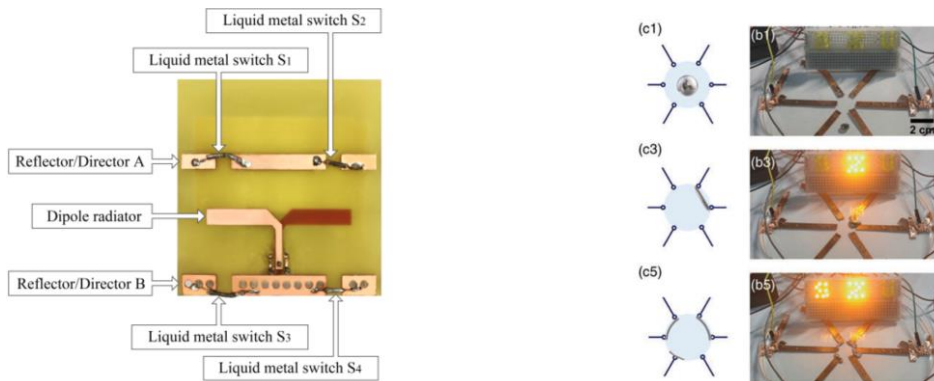


**Рисунок 6.** Пример размещения конформной антенны на фюзеляже БВС.

#### 4. Антенна из жидкого металла

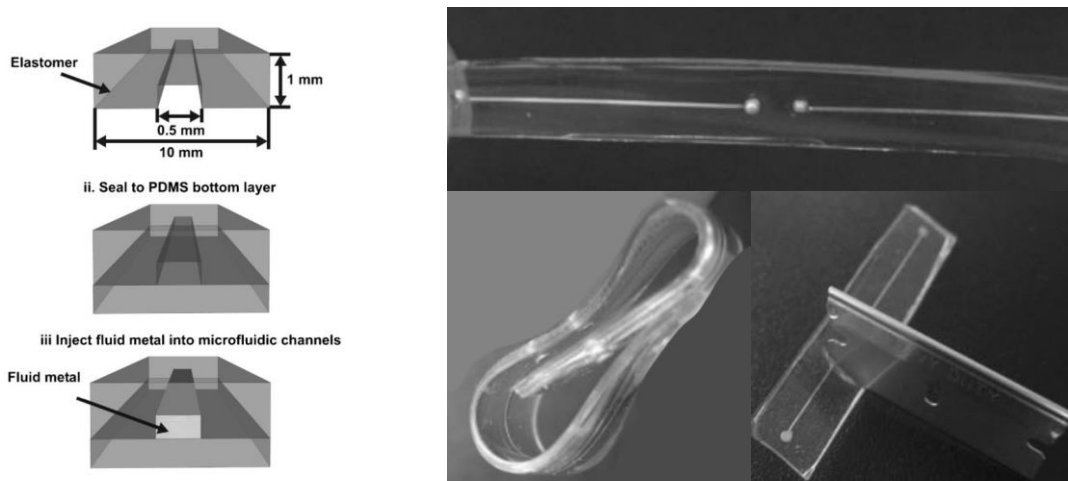
В последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к антеннам, имеющим в своем составе металл, находящийся в жидком агрегатном состоянии (жидкие металлы, ЖМ). Чаще всего в научной литературе под ЖМ подразумевают сплав галлий (80%) – индий (20%), но могут использоваться и другие компоненты в иных пропорциях.

Жидкие металлы используют как управляемую перемычку (переключатель) между элементами топологии, как показано на рисунке 7, для изменения конфигурации антенны [5, 6], так и для создания гибких антенн.



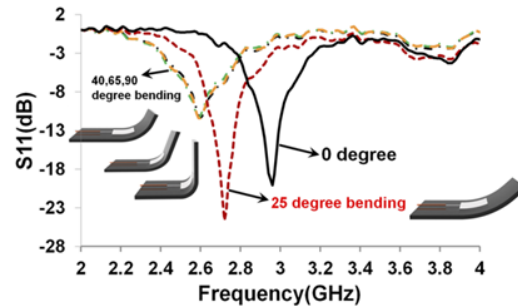
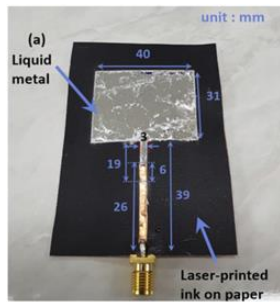
**Рисунок 7.** Примеры использования жидкого металла в качестве переключателя топологии антенны.

Гибкие антенны, изготовленные из эластичных полимеров с ЖМ – заполнением, обладают сочетанием конформности, устойчивости к повреждениям и технологичности изготовления (рисунок 8).



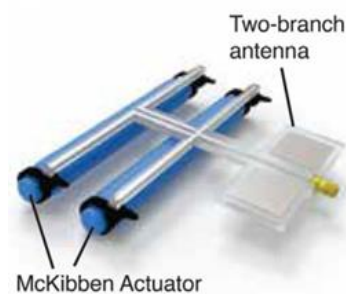
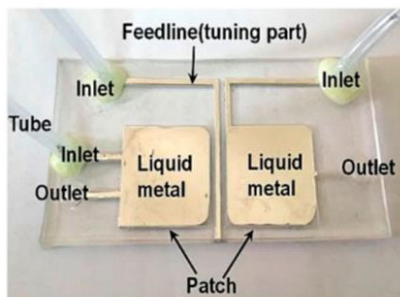
**Рисунок 8.** Процесс изготовления гибкой дипольной антенны и фотографии прототипа, растянутого, скрученного, с иллюстрацией устойчивости к механическому повреждению (порезу) [7].

В исследовании [8] авторы изготовили прототип конформной антенны на гибком основании. Особенностью данного исследования является зависимость частотных характеристик от угла изгиба антенны (рисунок 9).



**Рисунок 9.** Антенна из ЖМ на гибком основании и результаты измерения коэффициента отражения по входу в зависимости от угла изгиба.

Использование микронасоса позволяет перестраивать топологию антенны. Увеличение или уменьшение объема ЖМ в канале приводит к изменению размеров элементов, что, в свою очередь, меняет электрические характеристики антенны. Авторы исследования [9] заявляют, что при изменении длины фидерной линии, в которой размещен ЖМ, можно менять резонансную частоту антенны от 2,2 ГГц до 9,3 ГГц [9]. Авторы другого исследования [10] заявляют, что при использовании актуатора можно изменять частоту антенны от 900 МГц до 5 ГГц. На рисунке 10 приведены примеры антенн с перестраиваемой частотой.



**Рисунок 10.** Примеры использования жидкого металла в антеннах с перестройкой частоты.

## 5. Выводы

Использование ЖМ при изготовлении антенны имеет ряд перспективных преимуществ: возможность перестройки электрических параметров в широком диапазоне, манипулируя ЖМ в микроскопических масштабах можно достичь значительной точности в регулировании изменения формы и размеров антенны, возможность создания конформных антенн и структур. Тем не менее у данного метода имеются проблемы, требующие решения: подбор состава ЖМ для обеспечения работы антенны в широком температурном диапазоне, интеграция системы и принципов управления потока ЖМ в антенну, подбор гибкого основания антенны с необходимыми диэлектрическими характеристиками. Решение указанных проблем повысит эксплуатационные свойства, позволит расширить область применения антенн данного типа.

### Список литературы

1. Military Antenna Market Size & Share 2025 – 2034 [Electronic resource] // Global Market Insights Inc. (GMI). – URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/military-antenna-market>.
2. Zhu, L., Mao, H., Yan, G., Ma, W., Xiao, Z., Zhang, R. Movable and reconfigurable antennas for 6G: unlocking electromagnetic-domain design and optimization // npj Wireless Technology, February 2026, Vol.2, 5.

3. Yuk, K. Innovating ultra-wideband HF-VHF-UHF beamforming antennas for stealth naval use [Electronic resource] // Echoic Engineering LLC. – URL: <https://echoicrf.com/2021/10/27/innovating-ultra-wideband-hf-vhf-uhf-beamforming-antennas-for-stealth-naval-use>.
4. Андрущенко М.С., Голик А.М., Сахнов С.А., Терешин С.Н. Антенные системы беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Выпуск 5. С.230-236.
5. Babatain, W., Kim, M.S., Hussain, M. M. From Droplets to Devices: Recent Advances in Liquid Metal Droplet Enabled Electronics // *Advanced Functional Materials*, August 2024, Vol. 34, Issue 31, 2308116.
6. Yang, X., Ma, X., Yang, J., Li, Y., Peng, M. Zheng, Q. Liquid metal-based frequency and pattern reconfigurable Yagi antenna for pressure sensing // *Sensors*, February 2025, Vol. 25, Issue 5, 1498.
7. So, J., Thelen, J., Qusba, A., Hayes, G. J., Lazzi, G., Dickey, M. D. Reversibly deformable and mechanically tunable fluidic antennas // *Advanced Functional Materials*, November 2009, Vol.19, No.22, pp. 3632–3637.
8. Kim, D., Doo, S. J., Chung, S. K., et al. Frequency tunable liquid metal on paper microstrip patch antenna // *AIP Advances*, March 2023, Vol. 13, Issue 3, 035011
9. Abu Bakar, H., Abd Rahim, R., Soh, P. J., Akkaraekthalin, P. Liquid-Based Reconfigurable Antenna Technology: Recent Developments, Challenges and Future // *Sensors*, January 2021, Vol. 21, Issue 3, 827.
10. Song, Y., Bharambe, A., Patel, D. K., Zhuo, B., Zadan, M., Majidi, C., Kumar, S. Pneumatically-actuated liquid metal-based frequency reconfigurable antenna // *Advanced Science*, January 2026, Vol. 13, Issue 1, e12996.