

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.12>

УДК: 621.396.673

АНТЕННЫ МОБИЛЬНОГО АВТОНОМНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА БАЗЕ БПЛА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ЛОКАЛЬНЫХ РНС СВ-ДИАПАЗОНА

В.С. Панько, А.А. Ерохин, А.Г. Андреев

**Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28**

Статья поступила в редакцию 16 июня 2026 г.

Аннотация. В работе рассматривается актуальная задача повышения точности и безопасности морской навигации путем совершенствования методов контроля локальных радионавигационных систем средневолнового диапазона. В работе проведен сравнительный анализ эффективности электрически малых антенн электрического и магнитного типов в условиях ближней зоны излучения. Антенны предназначены для работы в составе мобильного автономного измерительного модуля, размещаемого на беспилотном летательном аппарате. Исследование выполнено для сигнала на частоте два мегагерца, что соответствует длине волны сто пятьдесят метров, при длине приёмной антенны один метр. В качестве основных характеристик рассматривались сопротивление излучения, коэффициент полезного действия, эффективная длина и мощность, выделяемая в нагрузке при заданных условиях распространения сигнала. Коэффициент полезного действия в свободном пространстве не отражает реальную эффективность антенн в режиме приема вблизи передатчика. Установлено, что у электрических антенн (диполь, нагруженный диполь, биконическая) сопротивление излучения составляет

тысячные доли Ома, что при сопоставимых омических потерях обеспечивает коэффициент полезного действия на уровне десятков процентов. У магнитных антенн (рамка, спираль) сопротивление излучения на несколько порядков меньше, вследствие чего их коэффициент полезного действия стремится к нулю. Однако при выборе чисто активной нагрузки, равной по модулю полному входному сопротивлению, магнитные антенны могут обеспечивать мощность в нагрузке, сопоставимую с электрическими. Наиболее высокие показатели мощности в нагрузке при минимальных массогабаритных параметрах демонстрирует нагруженный диполь с эффективной длиной около одного метра и коэффициентом полезного действия около тридцати семи процентов.

Ключевые слова: электрически малая антенна, электрическая антенна, магнитная антенна, СВ-диапазон, локальная радионавигационная система, радионавигация.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №25-29-20180, <https://rscf.ru/project/25-29-20180/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Автор для переписки: Ерохин Алексей Александрович, aerokhin@sfu-kras.ru

Введение

Согласно Правилам по оборудованию морских судов [1] в РФ, судно должно располагать несколькими системами навигации для резервирования на случай непредвиденных ситуаций, потери связи с основными навигационными системами, а также для уточнения координат. В качестве таких резервных систем широко применяются локальные радионавигационные системы (РНС), функционирующие в средневолновом (СВ) диапазоне и обслуживающие ограниченные акватории, например, РНС «Спрут-Н1» [2, 3].

Одним из основных источников погрешности измерения радионавигационных параметров в таких системах является многолучевое распространение сигналов. Вторичное излучение сигналов создается объектами, окружающими антенны опорных (ОС) и корабельных станций (КС).

Для исключения искажений фазовой диаграммы направленности антенны ОС следует размещать на открытых участках местности, что на практике обычно невозможно. Антенны КС, по своему назначению, вообще всегда размещаются в стесненных условиях на несущем корабле (судне) и в непосредственной близости от крупных проводящих элементов судна. Установлено [4-7], что наличие вблизи антенн радионавигационных станций (РНС) относительно небольших проводящих конструкций приводит к ошибкам измерения кодовой и фазовой псевдодальностей на уровне десятков метров. С учётом геометрического фактора результирующие погрешности определения координат потребителей РНС могут быть существенно выше. Поэтому актуальной задачей является поиск методов устранения или компенсации указанных искажений.

Устранение и компенсация указанных погрешностей требуют развития методов контроля характеристик антенн и условий распространения радиоволн непосредственно в акватории. Перспективным направлением является использование мобильных автономных измерительных модулей, устанавливаемых на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [8, 9]. Такой модуль может применяться для калибровки антенн ОС и КС РНС, а также для исследования влияния подстилающей поверхности на трассу распространения сигнала.

Ключевым элементом измерительного модуля является приемная антенна, эффективность работы которой в значительной степени определяет точность регистрации напряженности поля. Антенна измерительного модуля должна быть электрически малой и при этом обладать достаточной эффективностью для регистрации слабых сигналов, т.к. при размещении на БПЛА первостепенное значение приобретают массогабаритные ограничения. Работа таких антенн в СВ-диапазоне, где длина волны существенно превышает их физический размер, характеризуется рядом особенностей, непосредственно влияющих на энергетические и точностные характеристики измерительного тракта [10, 11].

В связи с этим в настоящей работе проводится сравнение различных типов малых антенн длиной 1 м, потенциально пригодных для использования в составе бортового измерительного комплекса БПЛА. Рассматриваются следующие

конструкции: «бабочка», биконическая, рамочная, обычный и нагруженный диполь, многовитковая спираль (воздушная и на ферритовом стержне). Сравнение выполняется по совокупности ключевых электрических параметров: сопротивлению излучения, коэффициенту полезного действия, эффективной длине, а также мощности, выделяемой в нагрузке.

1. Электрические параметры антенн

Электрические параметры антенн определяются в режиме излучения, моделирование проводится методом моментов. Для этой цели в порт модели антенны устанавливается источник напряжением 1 В.

1) Комплексное (активная и реактивная составляющие) входное сопротивление антенны Z_a (Ом). Определяется непосредственно методом моментов в виде активной R_a и реактивной части X_a :

$$Z_a = R_a + jX_a.$$

2) Коэффициент полезного действия η_a (%). Определяется как отношение излученной мощности P_Σ к мощности источника, подключенного к антенне P_a [12]:

$$\eta_a = \frac{P_\Sigma}{P_a}.$$

3) Сопротивление излучения R_Σ (Ом). Поскольку КПД антенны может быть определено через излученную мощность и сопротивление антенны [13]:

$$\eta_a = \frac{R_\Sigma}{R_a}, \quad (1)$$

то сопротивление излучения можно рассчитать из известных значений КПД и активной части входного сопротивления:

$$R_\Sigma = \eta_a R_a.$$

4) Действующая высота h_d (м). Определяется с помощью следующего выражения [14]:

$$h_d = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{DR_{\Sigma}}{120}}.$$

Здесь D – максимальный коэффициент направленного действия (КНД) антенны.

2. Рассматриваемые антенны

На рис. 1 и 2 показаны варианты исполнения антенн. При этом длина антенн составляет 1 м. Рассматриваемые антенны являются электрически малыми. РНС является средневолновой, центральная частота составляет 2 МГц, таким образом электрическая высота антенны составляет всего $0,0067\lambda$, где λ – длина волны.

Рассмотрены антенны электрического типа: дипольные антенны и вариации биконических антенн. Биконические антенны составлены из двух (антенны типа Бабочка) либо восьми секций. Также рассмотрен нагруженный диполь с емкостными нагрузками в виде дисков на обоих концах антенны.

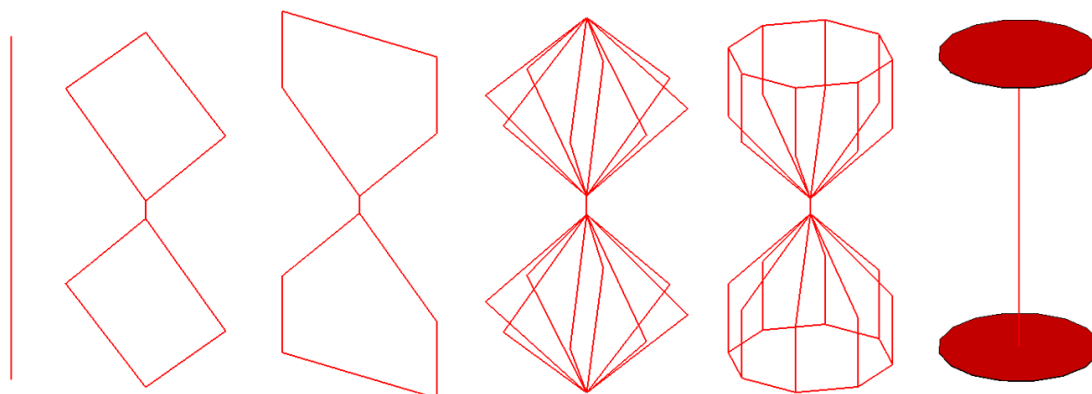


Рис. 1. Моделируемые антенны электрического типа. Слева направо: Диполь, Бабочка №1, Бабочка №2, Биконическая №1, Биконическая №2, Нагруженный диполь.

Антенны магнитного типа. Для рамочной антенны рассмотрены варианты с радиусом $R = 0,25$ м и $R = 0,5$ м. При $R = 0,5$ м рассмотрены варианты

с количеством витков $N = 1$ и $N = 5$. Антенна «Многовитковая спираль» представляет собой цилиндрическую катушку индуктивности без сердечника. Диаметр спирали составляет 1 см, количество витков $N = 10, N = 30, N = 50$.

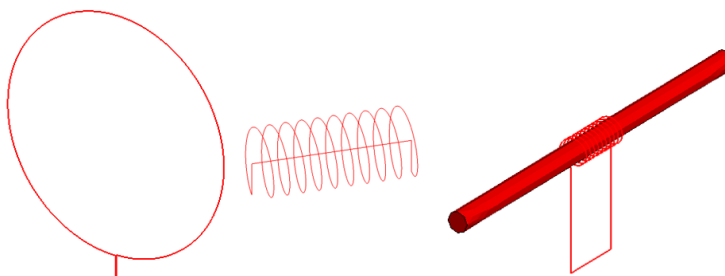


Рис. 2. Моделируемые антенны магнитного типа. Слева направо: Рамочная антенна, Многовитковая спираль, Многовитковая спираль на ферритовом стержне.

Антенна «Многовитковая спираль на ферритовом стержне» представляет собой цилиндрическую катушку индуктивности, намотанную на ферритовый стержень цилиндрической формы. Длина стержня составляет 20 см, диаметр 1 см, количество витков спирали $N = 10, N = 30, N = 50$. В модели использованы электрофизические параметры, соответствующие ферриту марки 400НН, так проводимость составляет $\sigma_{\text{ф}} = 0,0001 \text{ См/м}$, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 11$, тангенс магнитных потерь $\tan \delta_{\text{м}} = 0,04$, относительная магнитная проницаемость $\mu = 400$.

3. Моделирование

Моделирование антенн проводится методом моментов. При моделировании считается, что антенны выполнены из медного проводника (проводимость составляет $\sigma = 58130000 \text{ См/м}$), имеющего радиус 1 мм. Расчёт характеристик антенн, указанных в п. 1, проводится в свободном пространстве.

Помимо указанных в п. 1 характеристик антенн, рассчитанных в режиме излучения, оценим мощность $P_{\text{н}}$, выделяемую в нагрузке в режиме приема. Сопротивление $R_{\text{н}}$ оптимальное по критерию максимальной выделяемой мощности, на которое нагружается приемная антенна, выбрано по методике, приведенной в работах [10, 11]. При этом сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ считается

равным модулю полного входного сопротивления антенны Z_a . Источником сигнала является антенна ОС РНС, расстояние между приемной и передающей антеннами составляет $d = 300$ м, высота поднятия приемной антенны составляет $h = 50$ м.

В таблице 1 приведены полученные характеристики антенн. Мощность P_n нормирована на мощность, выделяемую в нагрузке дипольной антенны.

Таблица 1. Характеристики антенн.

Наименование антенны	Геометрические характеристики	R_Σ , Ом	η_a , %	h_d , м	R_n , кОм	P_n , дБ
Диполь	$L = 1$ м	8,87e-03	30,5	0,5	32,74	0
Бабочка №1	$R = 0,25$ м, $L = 1$ м	9,03e-03	36,6	0,51	13,7	3,2
Бабочка №2	$R = 0,25$ м, $L = 1$ м	1,30e-02	41,8	0,61	11,64	5,5
Биконическая №1	$R = 0,25$ м, $L = 1$ м	8,43e-03	57,7	0,49	6,40	6,3
Биконическая №2	$R = 0,25$ м, $L = 1$ м	1,31e-02	65,6	0,61	5,19	9,1
Нагруженный диполь	$R = 0,25$ м, $L = 1$ м	2,92e-02	36,8	0,91	7,27	11,2
Рамочная	$R = 0,25$ м, $N = 1$	2,38e-06	0,00	0,008	0,02	-5
	$R = 0,5$ м, $N = 1$	3,83e-05	0,02	0,033	0,05	3,6
	$R = 0,5$ м, $N = 5$	1,89e-03	0,10	0,23	3,93	6,1
Многовитковая спираль	$N = 10$	1,08e-10	0,00	3e-5	0,01	-42,1
	$N = 30$	9,75e-10	0,00	1,3e-4	0,02	-37,9
	$N = 50$	2,72e-09	0,00	2,6e-4	0,03	-35,7
Многовитковая спираль на ферритовом стержне	$N = 10$	6,00e-07	0,00	4,1e-3	0,14	-19,1
	$N = 30$	5,12e-06	0,00	0,0121	0,95	-18
	$N = 50$	1,26e-05	0,00	0,0189	1,97	-17,5

Как видно из приведенной таблицы все антенны обладают очень низким сопротивлением излучения, что связано с их малостью по сравнению с длиной волны.

КПД по выражению (1) можно записать как отношение сопротивления излучения R_Σ к сумме омических потерь R_n и самого сопротивления излучения R_Σ :

$$\eta_a = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma + R_n}.$$

Как известно [13, 14] сопротивление излучения рамочных антенн обратно пропорционально четвертой степени длины волны и прямо пропорционально четвертой степени размера антенны. Для антенн электрического типа сопротивление излучения снижается медленнее (обратно пропорционально квадрату длины волны и прямо пропорционально квадрату размера антенны). Таким образом, сопротивление излучения магнитных антенн крайне мало по сравнению с потерями, отчего их КПД стремится к нулю, в отличие от электрических антенн, у которых КПД получился достаточно высоким, т. к. сопротивление потерь соизмеримо с сопротивлением излучения. Оценка КПД антенн проведена в свободном пространстве.

Мощность в нагрузке антенн электрического типа определяется в основном собственной емкостью антенны. Например, объемная биконическая антенна имеет большую погонную емкость, чем плоская антенна бабочка, что снижает ее емкостное сопротивление. При подключении к высокоомной нагрузке биконическая антенна обеспечивает лучшую передачу мощности за счет меньшего собственного реактивного сопротивления.

Низкий КПД антенн магнитного типа показывает, что рамка плохо излучает энергию и имеет высокие внутренние тепловые потери. На расстоянии 300 метров от передающей антенны магнитное поле велико. Даже с учетом того, что часть энергии в приемной магнитной антенне превратится в тепло на омическом сопротивлении витков, оставшаяся доля мощности, ушедшая в нагрузку, все равно останется относительно большой в абсолютных значениях.

При заданных условиях наиболее эффективными являются электрические антенны типа «нагруженный диполь», «биконическая» или «бабочка». Они обеспечивают мощность в нагрузке выше, чем у магнитных антенн.

Заключение

Проведённый анализ электрически малых антенн (длиной порядка 1 м) на частоте 2 МГц показал, что их эффективность в составе мобильного измерительного модуля для локальных РНС определяется не только

классическими параметрами (КПД, сопротивление излучения), но и способом подключения нагрузки. Для антенн электрического типа (бабочка, биконическая, нагруженный диполь) сопротивление излучения имеет порядок $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Ом, что при сопоставимых омических потерях обеспечивает КПД на уровне десятков процентов. Для магнитных антенн (рамка, спираль, ферритовая антенна) сопротивление излучения пропорционально четвёртой степени размера и составляет $10^{-10} \dots 10^{-5}$ Ом, что приводит к крайне малому КПД ($< 0,1$ %).

Однако, при использовании чисто активной нагрузки, равной по модулю полному входному сопротивлению ($R_n \approx |X_a|$), даже магнитные антенны способны выделять мощность, сравнимую с электрическими.

С учётом требований к установке на БПЛА (малые масса и габариты) наилучшим выбором для измерительного модуля является нагруженный диполь как антенна электрического типа с максимальной эффективной длиной ($h_d = 0,91$ м) и высоким КПД (36,8 %), обеспечивающая наибольшую мощность в нагрузке. Многовитковые антенны на ферритовом стержне проигрывают по энергетике 25-30 дБ, а воздушные спирали непригодны для практического применения из-за низкой мощности, выделяемой в нагрузке. Кроме того, применение антенн магнитного типа требует ориентации БПЛА на измеряемую антенну, т. к. диаграмма направленности магнитных антенн является направленной в Н-плоскости.

Таким образом, для создания мобильного автономного измерительного модуля, предназначенного для калибровки антенн ОС и КС локальных РНС и исследования условий распространения сигналов в СВ-диапазоне, целесообразно использовать нагруженный диполь или близкие к нему по параметрам электрические антенны.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №25-29-20180, <https://rscf.ru/project/25-29-20180/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Литература

1. Правила по оборудованию морских судов. Часть V Навигационное оборудование: НД № 2-020101-144. Санкт-Петербург: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2021.
2. Селиверстов А. С. Высокоточная радионавигационная система «Спрут-Н1» //Записки по гидрографии. – 2019. – №. 308. – С. 54-64.
3. Куликовский И. В., Адамович О. Р., Бербенев Д. В. Направления совершенствования системы навигационно-гидрографического обеспечения Военно-Морского Флота //Военная мысль. – 2023. – №. 12. – С. 50-58.
4. Panko V. S. et al. Medium Wave Terrestrial Radio Navigation Systems Antenna Radiation Pattern Distortions Due to Multipath Propagation //2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – IEEE, 2024. – С. 1-5.
5. Panko V. S. et al. The Influence of Reradiation on the Phase Pattern of a Medium Wave Radio Navigation System Antenna //2024 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). – IEEE, 2024. – С. 52-54.
6. Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Саломатов Ю.П., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Влияние антенных согласующих цепей на погрешность измерения радионавигационных параметров в системах средневолнового диапазона при многолучевом распространении сигналов // Журнал радиоэлектроники – 2025. – №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.13>
7. Князева К.В., Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Искажения фазовой диаграммы направленности антенны СВ-диапазона при ее размещении на носителе. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.7.6>
8. Herbette Q. et al. HF Radar antenna near field assessment using a UAV //2019 International Radar Conference (RADAR). – IEEE, 2019. – С. 1-4.
9. Steiner H. J. et al. UAV-based near-field antenna measurements at 20 MHz of a reference ground-plane antenna //2021 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA). – IEEE, 2021. – С. 48-50.

10. Князева К.В., Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Выбор сопротивления нагрузки приемной электрически малой антенны по критерию минимальной неравномерности группового времени запаздывания принятого сигнала. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.5>
11. Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г., Князева К.В., Косолапов А.В., Нелипа С.Б. Моделирование электрически малых антенн средневолнового диапазона // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.8.11>
12. How to obtain radiation efficiency of an antenna in FEKO?: [сайт]. [2023]. URL: <https://community.altair.com/discussion/24618/how-to-obtain-radiation-efficiency-of-an-antenna-in-feko?tab=all>. Дата обращения: 01.06.2026.
13. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио, 1974. 536 с
14. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М., Клигер Г.А., Курашов А.Г. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.

Для цитирования:

Панько В.С., Ерохин А.А., Андреев А.Г. Антенны мобильного автономного измерительного модуля на базе БПЛА для калибровки локальных РНС СВ-диапазона. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.12>