

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-16](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-16)

MPHTI: 47.45.29



А.С. Инчин¹, А.Е. Кулакаева^{2*}, М.П. Сайганов¹, Ш.С. Болат¹

¹ТОО «Институт космической техники и технологий»

050061, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Кисловодская, 34

²АО «Международный университет информационных технологий»

050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Манаса, 34/1

*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИНТЕГРАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ GSM-АНТЕНН В ЭЛЕКТРОННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ПЛОМБЕ

Аннотация. В данной статье рассматривается практический вопрос выбора GSM-антенны для электронной навигационной пломбы, предназначенной для контроля и мониторинга перевозок. В отличие от традиционных методов, опирающихся на паспортные данные, акцент сделан на исследовании работы антенн в составе готового устройства с учетом влияния пластикового корпуса, внутренних металлических компонентов и общей компоновки электроники.

Для этого были проведены лабораторные испытания 28 коммерчески доступных плоских GSM-антенн диапазона GSM 900 в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации в навигационной пломбе. Оценка характеристик осуществлялась на стандартизированном измерительном стенде с использованием макета корпуса и эталонной антенны. Основным критерием сравнения являлся коэффициент стоячей волны, отражающий качество согласования антенны с радиомодулем и уровень потерь мощности.

При выборе также учитывались ограничения по габаритам корпуса, имеющие важное значение для практической интеграции. На основании комплексного анализа были отобраны антенны, обеспечивающие стабильную связь и достаточную энергетическую эффективность, и рекомендованы для использования в серийных электронных навигационных пломбах.

Полученные результаты подтверждают, что корректный выбор антенны невозможен без учета условий ее установки в составе конкретного устройства, а испытания в условиях, приближенных к реальной компоновке, являются важным этапом при разработке навигационных систем, эксплуатируемых в условиях ограниченного внутреннего объема и плотной компоновки элементов.

Ключевые слова: навигационная пломба, GSM-антенна, плоская антенна, коэффициент стоячей волны, KCB, диапазон GSM 900, согласование антенны, логистика.

Введение

В последние годы в Республике Казахстан особое внимание уделяется вопросам повышения эффективности и безопасности перевозок товаров, что связано с важным стратегическим положением страны в региональных и международных транспортных коридорах. С учетом роста объемов грузоперевозок, ужесточения требований к прослеживаемости товаров и усиления контроля за логистическими цепочками, особенно актуальными становятся электронные навигационные пломбы. Эти устройства обеспечивают дистанционный мониторинг местоположения и состояния груза в режиме реального времени.

Электронные навигационные пломбы, помимо обеспечения сохранности груза, должны отвечать строгим техническим и эксплуатационным требованиям, определенным Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 4 июля 2023 года № 75 [1]. Ключевые требования включают: наличие сменного многоцветного элемента пломбирования,

автоматический контроль целостности, уникальный идентификационный номер, возможность дистанционного управления через национального телекоммуникационного оператора, высокую степень защиты корпуса (IP67 и выше), широкий диапазон рабочих температур (от -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$), а также длительную автономную работу (не менее 30-45 суток) в различных режимах передачи данных.

В настоящее время электронные и навигационные пломбы находят все более широкое применение в грузоперевозках, обеспечивая контроль целостности груза, его местоположения и параметров движения на протяжении всего маршрута [2]. Грузоперевозки, как основа мировой торговли, обеспечивают около 80% международного товарооборота благодаря своей экономичности и гибкости мультимодальных схем [3]. Однако увеличение объемов перевозок влечет за собой новые проблемы: изменение климата, перегруженность инфраструктуры и рост социальных издержек, таких как пробки и аварийность, усложняют логистические маршруты. Для повышения устойчивости логистики предлагается оптимальное сочетание автомобильного и железнодорожного транспорта между портами, что позволяет сбалансировать скорость, стоимость и экологичность перевозок [4].

Внедрение цифровых контейнеров, оснащённых датчиками и коммуникационными модулями, позволяет отслеживать местоположение, состояние груза и параметры окружающей среды в режиме реального времени. Это не только снижает риски утраты и повреждений, но и предоставляет данные для оптимизации перевозок [5]. В условиях ужесточения таможенных процедур и многоуровневых проверок на границах электронная навигационная пломба становится важным элементом многослойной системы безопасности, повышая сохранность грузов и общую эффективность логистики [5].

Современный рынок предлагает разнообразные решения, среди которых RFID широко признана как удобное средство для идентификации и контроля грузов [6, 7]. В то же время в некоторых развивающихся странах для удалённого мониторинга и блокировки транспортных средств внедряются IoT-решения, использующие GPS и GSM/GPRS [8].

В Китае представлены более универсальные технологические решения, в том числе многофункциональные навигационные пломбы с интерфейсами GPS/GSM, поддерживающие BLE и NFC для взаимодействия со смартфонами и удалённого управления замковыми механизмами через мобильные приложения. Такие устройства применяются в отраслях, связанных с транспортировкой пищевых продуктов, нефтехимии и газовой продукции [9]. Однако, несмотря на высокую технологическую оснащённость, эти разработки не обеспечивают полноценной оценки энергоэффективности и устойчивости связи в условиях длительной автономной эксплуатации.

Современные исследования акцентируют внимание на информационной безопасности и защищенной связи. В работе [10] представлена интеллектуальная система мониторинга ценных грузов, которая объединяет GPS, RFID и беспроводные сенсорные сети (WSN) для зондирования окружающей среды и отслеживания в реальном времени. Важным элементом архитектуры этой системы является легковесная криптосистема на основе идентификационных атрибутов (IBC), обеспечивающая защищенную передачу данных и управление доступом даже в устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, таких как электронные пломбы.

Одним из направлений развития электронных навигационных пломб (ЭНП) является обеспечение информационной безопасности и устойчивой связи в различных эксплуатационных условиях. В работе [11] предложен гибридный криптографический механизм, который сочетает симметричное и асимметричное шифрование. Это особенно актуально для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами. Однако, несмотря на важность таких подходов, внимание в них в основном сосредоточено на протоколах безопасности, в то время как физические и радиочастотные аспекты конструкции навигационных пломб, критически важные для обеспечения энергоэффективности и стабильной связи, остаются без должного внимания.

В ряде исследований основное внимание уделяется высокочастотным каналам передачи данных в замкнутых металлических средах. Например, в работе [12] рассматривается навигационная пломба, работающая на частоте 60 ГГц, с акцентом на параметр RDS и влияние геометрии корпуса. Аналогичные выводы представлены в исследованиях [13], где предложена внутрикластерная модель трассировки лучей (RT-ICM)

для mmWave-каналов, и [14], в котором анализируются резонансные режимы и потери пути внутри металлических корпусов для THz-диапазона [15].

Интеграция GSM-антенны в ограниченное пространство корпуса навигационной пломбы сопряжена со значительными трудностями. Необходимо обеспечить герметичность (соответствие стандарту IP67), устойчивость к вибрационным и температурным нагрузкам, а также учитывать близость металлических элементов и аккумуляторов. Практический опыт показывает, что даже незначительные ошибки в выборе или размещении антенны могут привести к увеличению коэффициента стоячей волны (КСВ), повышению энергопотребления радиомодуля и снижению общей надежности устройства.

Анализ литературных источников выявил, что, несмотря на существенный прогресс в проектировании навигационных пломб, в инженерной и научной среде отсутствуют системные, экспериментально подтвержденные подходы к выбору и проверке GSM-антенн для компактных автономных устройств, учитывающие сложные условия эксплуатации. Большинство существующих исследований ограничиваются либо лабораторными экспериментами, либо теоретическим анализом и зачастую не принимают во внимание особенности герметичных пластиковых корпусов и реальные климатические, электромагнитные и механические воздействия.

В рамках данной работы проведено экспериментальное сравнение характеристик 28 коммерческих плоских GSM-антенн с целью выбора оптимального решения для разработки электронной навигационной пломбы.

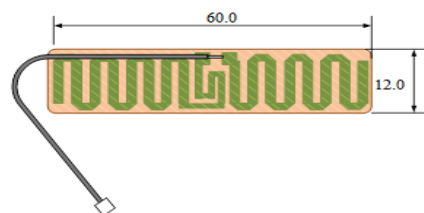
Полученные результаты позволяют разрабатывать собственные навигационные пломбы, полностью соответствующие специфическим требованиям Республики Казахстан и учитывающие все региональные климатические, географические и инфраструктурные особенности.

Методы исследования

Для создания собственного прототипа навигационной пломбы была использована программа SolidWorks, которая позволила детально разработать конструкцию с учетом требований к прочности, совместимости модулей и габаритам.

Целью данной работы было проведение комплексного исследования и сравнительного анализа плоских GSM-антенн, произведенных компанией Shenzhen Kexin Wireless Technology Co., Ltd. (Китай), с целью выбора наиболее подходящих моделей для использования в электронной навигационной пломбе собственного производства

Так, в ходе исследования было испытано 28 типов плоских коммерческих GSM-антенн данного производителя, каждой из которых был присвоен уникальный номер (№ 1–28). Для обеспечения объективного сравнения использовалась антенна «Змейка», разработанная в ТОО «Институт космической техники и технологий» на текстолитовой подложке, в качестве образцовой по КСВ в диапазоне GSM 900 МГц (рис. 1) [16].



а) схематичное изображение



б) фотография макета реализованной антенны



в) антенна внутри пластикового корпуса рядом с металлической пластиной

Рисунок 1 – Внешний вид и чертеж образцовой антенны «Змейка» и условия измерения КСВ покупных антенн

Антенна «Змейка» демонстрировала наилучшие показатели КСВ в заданном диапазоне и соответствовала габаритным ограничениям для интеграции в герметичный пластиковый корпус навигационной пломбы. Поэтому на всех графиках КСВ исследуемых антенн характеристики сравнивались с параметрами данной антенны, которая

использовалась исключительно как референсная (контрольная) для сравнительной оценки и не рассматривалась для интеграции в корпус разрабатываемой навигационной пломбы.

Для оценки влияния материала и толщины пластикового корпуса навигационной пломбы, а также близлежащих внутренних металлических узлов, электронной платы, батареи и проводов на частоту настройки и качество согласования антенн с GSM-модулем, все испытания проводились с использованием макета пластикового корпуса. Чтобы максимально приблизить условия эксперимента к реальным, каждая антенна крепилась к пластиковой пластине, имитирующей корпус пломбы, и располагалась в 1 см от металлической пластины, моделирующей внутренние металлические компоненты.

Лабораторные измерения проводились с использованием векторного анализатора цепей Keysight FieldFox N9915A на частотах 890 МГц (uplink) и 960 МГц (downlink), что соответствует рабочему диапазону GSM 900. Для каждой антенны вычислялось среднее значение KСВ, которое затем классифицировалось по следующей шкале: значения менее 2 считались отличными, диапазон от 2 до 3 относился к хорошему уровню, от 3 до 5 к удовлетворительным, от 5 до 7 к низкому качеству, а показатели выше 7 признавались неприемлемыми для использования. Все измерения проводились на одном и том же стенде для обеспечения сопоставимости результатов.

Следует отметить, что деревянный стол, на котором была установлена аппаратура, оказывает незначительное влияние на KСВ всего 1-2%. В то же время материал корпуса навигационной пломбы и близкое расположение антенны к металлическим элементам конструкции значительно влияют на этот параметр, изменяя его на 10-20%. Поэтому влияние стола в условиях эксперимента не учитывалось.

Для объективной оценки эффективности согласования антенн в работе использовалась общепринятая инженерная зависимость между KСВ и долей отраженной мощности, возвращаемой в линию передачи. KСВ позволяет количественно оценить, насколько эффективно антенна согласована с линией передачи сигнала. Следовательно, чем меньше значение KСВ, тем ниже потери на отражение и выше эффективность работы антенной системы [17].

Результаты

Основной целью исследования было определение оптимальных моделей GSM-антенн для навигационной пломбы, принимая во внимание эксплуатационные и конструктивные ограничения.

Рисунок 2 демонстрирует внешний вид опытного образца разрабатываемой навигационной пломбы. Корпус устройства изготовлен из прочного и износостойкого пластика, обеспечивающего защиту от воздействия влаги и пыли по классу IP67.



Рисунок 2 – Разрабатываемая навигационная пломба

Разрабатываемая навигационная пломба является многофункциональным устройством, обеспечивающим высокую степень безопасности при транспортировке ценных грузов благодаря своей продуманной конструкции.

Качество и надежность передачи данных в беспроводных системах во многом зависят от характеристик используемой антенны. Поэтому следующим важным этапом исследования стал выбор, анализ и экспериментальная проверка различных антенных решений. В условиях ограниченного внутреннего объема корпуса, наличия металлических элементов и необходимости поддержания герметичности, подбор оптимальной антенны становится важным элементом для обеспечения стабильной работы устройства. В рамках данной работы

была проведена серия лабораторных испытаний антенн, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации навигационной пломбы.

Детальное исследование параметра KCB различных антенн и их согласование с радиомодулем являются важными задачами для обеспечения надежной и энергоэффективной работы устройства, особенно в сложных и нестабильных условиях беспроводной сети.

В ходе испытаний для каждой антенны были получены значения KCB на двух рабочих частотах: 890 МГц (uplink) и 960 МГц (downlink). На основе этих измерений было рассчитано среднее значение KCB, после чего произведена градация по принятой шкале качества. Результаты по всем исследованным моделям, включая средние значения KCB, присвоенные оценки качества и показатели CSQ, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения KCB и CSQ антенн

Антенна №	KCB (890 МГц – uplink)	KCB (960 МГц – downlink)	Средний KCB	Оценка
0 (образцовый), собственная разработка	1,137	1.276	1.206	5
1 (GSM0001)	1,146	1,565	1,355	5
2 (GSM0002)	1,705	1,686	1,696	5
3 (GSM0003)	2,519	2,991	2,755	4
4 (GSM0004)	2,101	4,370	3,236	3
5 (GSM0005)	3,115	1,963	2,539	4
6 (GSM0006)	1,669	2,000	1,835	5
7 (GSM0007)	2,297	2,327	2,312	4
8 (GSM0008)	4,900	5,919	5,410	2
9 (GSM0009)	2,352	1,556	1,954	5
10 (GSM0010)	10,830	9,004	9,917	1
11 (GSM0011)	2,490	5,789	4,140	3
12 (GSM0012)	1,325	2,941	2,133	4
13 (GSM0013)	1,687	1,748	1,718	5
14 (GSM0014)	5,026	6,179	5,603	2
15 (GSM0015)	7,956	9,124	8,540	1
16 (GSM0016)	2,467	3,204	2,836	4
17 (GSM0017)	1,342	1,485	1,414	5
18 (GSM0018)	14,000	13,890	13,945	1
19 (GSM0019)	1,544	2,624	2,084	4
20 (GSM0020)	2,003	2,337	2,170	4
21 (GSM0021)	3,623	5,365	4,494	3
22 (GSM0022)	3,649	3,335	3,492	3
23 (GSM0023)	3,227	3,858	3,543	3
24 (GSM0024)	2,511	2,702	2,607	4
25 (GSM0025)	1,634	1,527	1,580	5
26 (GSM0026)	2,221	2,865	2,543	4
27 (GSM0027)	1,654	1,656	1,655	5
28 (GSM0028)	6,780	5,287	6,034	2

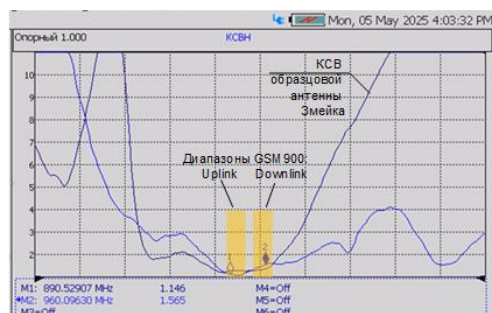
На основе рассчитанных средних значений KCB в рабочем диапазоне GSM 900 МГц была проведена подробная классификация всех исследованных моделей антенн по 5-балльной шкале качества. Как показано в таблице 2, антенны с номерами 1, 2, 6, 9, 13, 17, 25 и 27 продемонстрировали наилучшие показатели согласования с радиомодулем и были отнесены к категории «отлично». Девять антенн (3, 5, 7, 12, 16, 19, 20, 24, 26) показали устойчивые значения KCB, что позволило отнести их к классу «хорошо». Пять моделей (4, 11, 21, 22 и 23) были оценены как «удовлетворительно». Антенны под номерами 8, 14 и 28 были классифицированы как «плохие» по параметру согласования, а образцы 10, 15 и 18 были отнесены к категории «неприемлемо», что указывает на недопустимо высокие потери мощности и неэффективность в реальной эксплуатации.

Таблица 2 – Классификация антенн по качеству

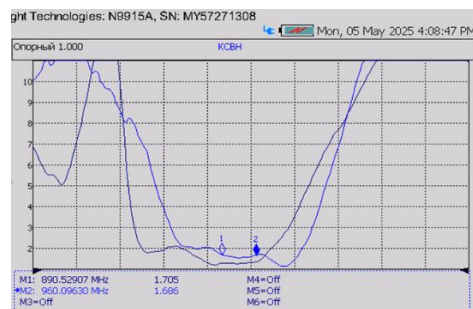
Оценка	Антенна №
5 (отлично)	1, 2, 6, 9, 13, 17, 25, 27
4 (хорошо)	3, 5, 7, 12, 16, 19, 20, 24, 26
3 (удовлетворительно)	4, 11, 21, 22, 23
2 (плохо)	8, 14, 28
1 (неприемлемо)	10, 15, 18

Такое распределение позволяет объективно сравнить широкий спектр коммерческих антенн и выбрать наиболее подходящие для последующего использования в электронной навигационной пломбе.

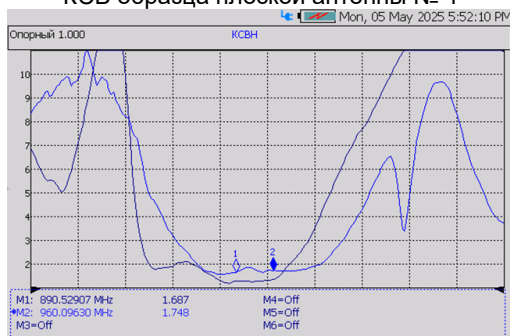
Для визуализации частотных характеристик антенн, показавших наилучшие результаты, на рисунке 3 представлены графики зависимости КСВ от частоты для антенн № 1, № 2, № 13 и №25. На каждом графике отмечены две контрольные точки. Марке 1 соответствует частоте uplink (890 МГц), а маркер 2 – частоте downlink (960 МГц).



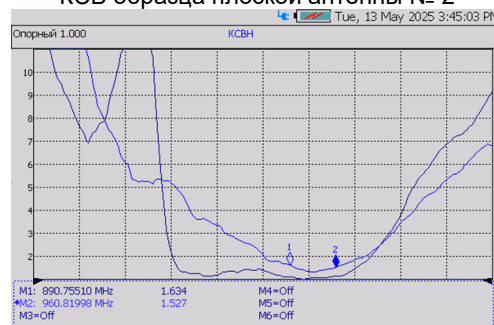
КСВ образца плоской антенны № 1



КСВ образца плоской антенны № 2



КСВ образца плоской антенны № 13



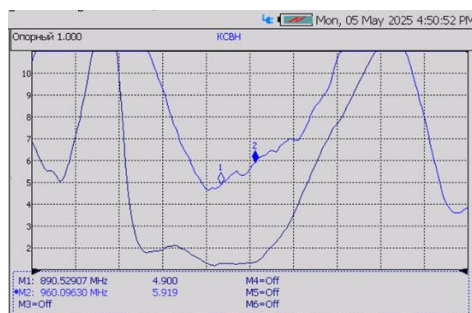
КСВ образца плоской антенны № 25

Рисунок 3 – Частотные характеристики КСВ антенн с наилучшими показателями

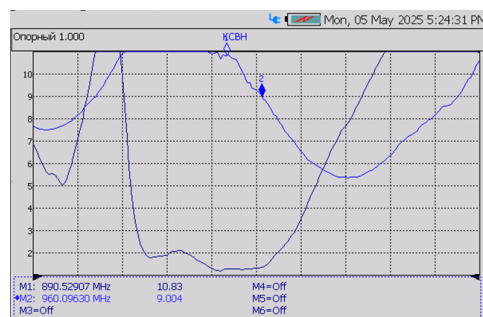
На рисунке 3 видно, что антенны в обеих контрольных точках показали значения КСВ, близкие к единице. Это свидетельствует о практически идеальном согласовании с радиомодулем. Например, для антенны № 25 (рис. 3) значения КСВ в точках 890,53 МГц и 960,10 МГц составили 1,634 и 1,527 соответственно, что указывает на высокий уровень эффективности передачи сигнала.

Демонстрация графиков КСВ для лучших образцов позволяет показать их преимущества по сравнению с другими протестированными моделями и обосновать выбор этих образцов для дальнейшего использования и внедрения в промышленное производство. В то же время некоторые исследованные образцы антенн продемонстрировали крайне неудовлетворительные электрические характеристики, что делает их использование в составе навигационной пломбы невозможным. Это отчетливо видно на соответствующих графиках (рис. 4), где во всех контрольных точках значения КСВ превышают допустимые пределы, а характер кривых свидетельствует о плохом согласовании с радиомодулем и высоких потерях энергии.

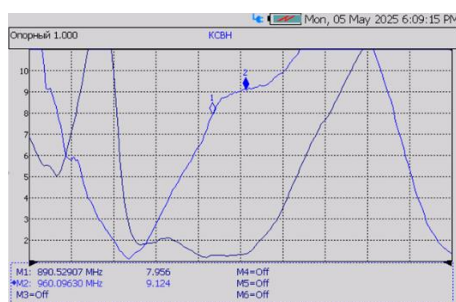
Таким образом, из-за значительного риска потерь мощности, ухудшения связи и преждевременной разрядки аккумулятора устройства, указанные антенны были признаны непригодными и не рекомендованы для использования в массовом производстве навигационных пломб.



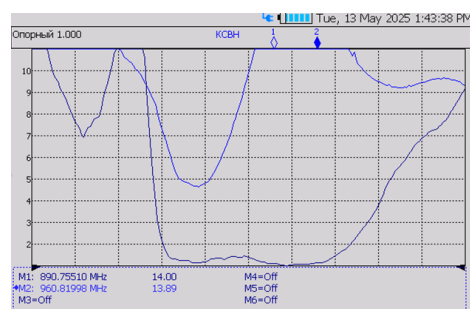
КСВ образца плоской антенны № 8



КСВ образца плоской антенны № 10



КСВ образца плоской антенны № 15



КСВ образца плоской антенны № 18

Рисунок 4 – Частотные характеристики КСВ антенн с наихудшими показателями

Разброс значений КСВ обусловлен конструктивными и геометрическими особенностями исследованных антенн, а также влиянием корпуса навигационной пломбы, в частности диэлектрической проницаемостью пластика и расположением металлических элементов. На рисунках 3 и 4 представлены графики, иллюстрирующие крайние случаи (антенны с наилучшими и наихудшими характеристиками) и в целом отражающие диапазон результатов, полученных для всей выборки из 28 антенн.

После предварительной оценки антенн по электрическим характеристикам был проведен дополнительный анализ соответствия габаритам корпуса навигационной пломбы всех восьми антенн, получивших оценку «отлично» ($КСВ < 2$) в таблице 2. Этот этап отбора был необходим для выявления моделей, обеспечивающих оптимальные параметры передачи сигнала ($КСВ < 2$) и при этом соответствующих ограничениям по внутреннему объему устройства. Результаты проверки соответствия длины и ширины антенн установленным требованиям представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Габаритный отбор среди наиболее качественных по КСВ антенн

Антенна №	Длина (мм)	Ширина (мм)	Допускается/ не допускается
1	78	6.5	Не допускается
2	40	12	Допускается
6	32	7	Допускается
9	120	50	Не допускается
13	124	14	Не допускается
17	112	16	Не допускается
25	40	15	Допускается
27	102	15	Не допускается

Анализ результатов испытаний показал, что из всех протестированных антенн только № 2, № 6 и № 25 соответствуют как электрическим, так и габаритным требованиям. Эти антенны могут быть рекомендованы для последующего использования в составе навигационной пломбы, поскольку обеспечивают высокую эффективность работы и полностью соответствуют конструктивным ограничениям устройства.

Испытания выявили значительную зависимость электрических характеристик плоских GSM-антенн не только от их конструкции, но и от условий установки внутри корпуса навигационной пломбы. Даже антенны одного производителя демонстрируют существенный

разброс значений КСВ, обусловленный различиями в геометрии излучающих элементов и их чувствительностью к близлежащим металлическим частям и диэлектрическому материалу корпуса. Практические измерения подтверждают, что именно корпус и внутренняя компоновка оказывают определяющее влияние на согласование антенны с радиомодулем.

Сравнительный анализ показал, что удовлетворительные значения КСВ сами по себе недостаточны для выбора оптимальной антенны. Некоторые образцы с хорошими электрическими характеристиками непригодны из-за несоответствия габаритным ограничениям корпуса. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к выбору антенного решения. Совместный учет электрических и конструктивных критериев позволил установить, что лишь ограниченное число антенн обеспечивает требуемый уровень согласования, сохраняя при этом возможность интеграции в герметичный корпус навигационной пломбы.

Заключение

Проведено комплексное экспериментальное исследование плоских коммерческих GSM-антенн с целью определения возможности их использования в разрабатываемой электронной навигационной пломбе. Испытания проводились в условиях, приближенных к реальным, с учетом влияния пластикового корпуса и внутренних металлических компонентов, что позволило объективно оценить характеристики антенн в составе готового устройства.

Результаты измерений выявили значительную зависимость электрических параметров антенн от их конструкции и условий установки. В частности, некоторые коммерческие антенны, демонстрировавшие приемлемый КСВ в свободном пространстве, теряли работоспособность после интеграции в корпус пломбы. Это подчеркивает важность тестирования антенн непосредственно в условиях, соответствующих реальной компоновке устройства.

На основе комплексной оценки электрических и габаритных характеристик определены антенны, обеспечивающие оптимальное согласование с радиомодулем и соответствующие конструктивным ограничениям корпуса. Рекомендуется использовать выбранные антенные решения в дальнейшей разработке и серийном производстве электронной навигационной пломбы, поскольку они обеспечивают стабильную связь и повышенную энергетическую эффективность устройства в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 4 июля 2023 года № 75.
2. Lyu J. Digital Technique-Enabled Container Logistics Supply Chain Sustainability Achievement / J. Lyu, F. Zhou, Y. He // Sustainability. – 2023. – № 15. – P. 16014. <https://doi.org/10.3390/su152216014>.
3. Smart logistics based on the internet of things technology: An overview / Y. Ding et al // Int. J. Logist. Res. Appl. – 2021. – № 24. – P. 323-345.
4. Durajczyk P. Possibilities of Using Inland Navigation to Improve the Efficiency of Interurban Freight Transport with the Use of the RIS System – Case Study of the Route Opole-Szczecin / P. Durajczyk, N. Drop, P. Niedzielski // Sustainability. – 2024. – № 16. – P. 10754. <https://doi.org/10.3390/su162310754>.
5. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports / K. Wang et al // Case Stud. Transp. Policy. – 2021. – № 9. – P. 1298-1312.
6. Daschkovska K. Decision Support in Supply Chains Based on E-Seals Secure System / K. Daschkovska // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, Issue 1. – P. 14224-14229. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2096>.
7. Natabita A. Implementation of Electronic Seal Cargo at Cikarang Dry Port to Support National Logistics System / A. Natabita, N. Nurillah, K. Komang // Journal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi. – 2024. – № 5. P. 1352-1361. <https://doi.org/10.35870/jimik.v5i2.618>.
8. Smart anti-theft vehicle tracking system for Bangladesh based on Internet of Things / M.S. Uddin et al // 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh. – 2017. – P. 624-628. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2017.8255432>.
9. Jiang Xia. Research and Practice of the E-seal / Jiang Xia, Meng Shu, Li, Qingli // E-lock system based on mobile internet. – 2017. <https://doi.org/10.2991/iccia-17.2017.42>.
10. ID-based secure real-time tracking system / C.Y. Yeun et al // International Journal of Advanced Logistics. – 2015. – № 4(2). – P. 100-114. <https://doi.org/10.1080/2287108X.2015.1049684>.

11. Securing E-Seal real time tracking system for Internet of Things /M. al Shemali et al // 2013 8th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions, ICITST. – 2013. – P. 65-69. <https://doi.org/10.1109/ICIST.2013.6747506>.
12. Seyran Khademi, Zoubir Irahhaute, and Alle-Jan van der Veen. 60 GHz Wireless Link Within Metal Enclosures: Channel Measurements and System Analysis. arXiv:1311.4439v1 [cs.IT]. – 2013.
13. Yavuz Yaman, Predrag Spasojevic. An Intra-Cluster Model with Diffuse Scattering for mmWave Communications: RT-ICM. Submitted on 20 May 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08295>.
14. Fu J. 300 GHz Channel Characterization of Chip-to-Chip Communication in Metal Enclosure / J. Fu, P. Juyal, A. Zajić // 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019. – P. 1-5.
15. Zhang Yueping. An Overview of the Development of Antenna-in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices / Zhang Yueping, Mao Junfa // Proceedings of the IEEE. – 2019. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2933267>.
16. Институт космической техники и технологий <https://istt.kz>
17. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design / C.A. Balanis // John wiley & sons. – 2016.

References

1. Reshenie Soveta Evraziiskoi ehkonomicheskoi komissii ot 4 iyulya 2023 goda № 75. (In Russian).
2. Lyu J. Digital Technique-Enabled Container Logistics Supply Chain Sustainability Achievement / J. Lyu, F. Zhou, Y. He // Sustainability. – 2023. – № 15. – R. 16014. <https://doi.org/10.3390/su152216014>. (In English).
3. Smart logistics based on the internet of things technology: An overview / Y. Ding et al // Int. J. Logist. Res. Appl. – 2021. – № 24. – R. 323-345. (In English).
4. Durajczyk P. Possibilities of Using Inland Navigation to Improve the Efficiency of Interurban Freight Transport with the Use of the RIS System – Case Study of the Route Opole–Szczecin / P. Durajczyk, N. Drop, P. Niedzielski // Sustainability. – 2024. – № 16. – R. 10754. <https://doi.org/10.3390/su162310754>. (In English).
5. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports / K. Wang et al // Case Stud. Transp. Policy. – 2021. – № 9. – R. 1298-1312. (In English).
6. Daschkovska K. Decision Support in Supply Chains Based on E-Seals Secure System / K. Daschkovska // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, Issue 1. – P. 14224-14229. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2096>. (In English).
7. Natabita A. Implementation of Electronic Seal Cargo at Cikarang Dry Port to Support National Logistics System / A. Natabita, N. Nurillah, K. Komang // Journal Indonesia : Manajemen Informatika dan Komunikasi. – 2024. – № 5. R. 1352-1361. <https://doi.org/10.35870/jimik.v5i2.618>. (In English).
8. Smart anti-theft vehicle tracking system for Bangladesh based on Internet of Things / M.S. Uddin et al // 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka, Bangladesh. – 2017. – R. 624-628. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2017.8255432>. (In English).
9. Jiang Xia. Research and Practice of the E-seal / Jiang Xia, Meng Shu, Li, Qingli // E-lock system based on mobile internet. – 2017. <https://doi.org/10.2991/iccia-17.2017.42>. (In English).
10. ID-based secure real-time tracking system / C.Y. Yeun et al // International Journal of Advanced Logistics. – 2015. – № 4(2). – R. 100-114. <https://doi.org/10.1080/2287108X.2015.1049684>. (In English).
11. Securing E-Seal real time tracking system for Internet of Things /M. al Shemali et al // 2013 8th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions, ICITST. – 2013. – R. 65-69. <https://doi.org/10.1109/ICIST.2013.6747506>. (In English).
12. Seyran Khademi, Zoubir Irahhaute, and Alle-Jan van der Veen. 60 GHz Wireless Link Within Metal Enclosures: Channel Measurements and System Analysis. arXiv:1311.4439v1 [cs.IT]. – 2013. (In English).
13. Yavuz Yaman, Predrag Spasojevic. An Intra-Cluster Model with Diffuse Scattering for mmWave Communications: RT-ICM. Submitted on 20 May 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08295>. (In English).
14. Fu J. 300 GHz Channel Characterization of Chip-to-Chip Communication in Metal Enclosure / J. Fu, P. Juyal, A. Zajić // 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, R. 1-5. (In English).

15. Zhang Yueping. An Overview of the Development of Antenna-in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices / Zhang Yueping, Mao Junfa // Proceedings of the IEEE. – 2019. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2933267>. (In English).
16. Institut kosmicheskoi tekhniki i tekhnologii <https://istt.kz>. (In Russian).
17. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design / C.A. Balanis // John Wiley & sons. – 2016. (In English).

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках конкурса на программно-целевое финансирование по научным, научно-техническим программам на 2024-2026 годы, ИРН программы BR24992884 «Разработка опытного образца электронного идентификатора с целью дальнейшей организации их производства».

А.С. Инчин¹, А.Е. Кулакаева^{2*}, М.П. Сайганов¹, Ш.С. Болат¹

¹ЖШС «Ғарыштық техника және технологиялар институты»
050061, Қазақстан Республикасы, Алматы қ, Кисловодская көшесі, 34

²«Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» АҚ
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Манас 34/1 көшесі

*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

ЭЛЕКТРОНДЫҚ НАВИГАЦИЯЛЫҚ ПЛОМБА ҚҰРАМЫНДАҒЫ ЖАЛПАҚ GSM-АНТЕННАЛАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫНА ИНТЕГРАЦИЯЛАУ ЖАҒДАЙЛАРЫНЫҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа. Бұл мақалада тасымалдауды бақылау және мониторинг жасауға арналған электрондық навигациялық пломба үшін GSM-антеннаны таңдау мәселесі қарастырылады. Дәстүрлі тәсілдер көбіне паспорттық сипаттамаларға сүйенсе, бұл зерттеуде антенналардың дайын құрылғы құрамындағы жұмысын, пластик корпусның, ішкі металл компоненттердің және электрондық тораптардың жалпы құрылымының әсерін ескере отырып талдауға басымдық берілді.

Осы мақсатта GSM 900 диапазонына арналған 28 коммерциялық қолжетімді жалпақ GSM-антенна навигациялық пломбаның нақты пайдалану жағдайларына барынша жақын ортада зертханалық сынақтан өткізілді. Сипаттамалар стандартталған өлшеу стендінде корпус макеті мен эталондық антеннаны пайдалану арқылы бағаланды. Негізгі салыстыру критерийі ретінде антеннаның радиомодульмен келісу сапасын және қуат шығындарының деңгейін сипаттайтын тұрақты толқын коэффициенті алынды.

Таңдау барысында корпусның габариттік шектеулері де ескерілді, себебі олар практикалық интеграция үшін маңызды фактор болып табылады. Кешенді талдау нәтижесінде тұрақты байланыс пен жеткілікті энергетикалық тиімділікті қамтамасыз ететін антенналар іріктеліп, навигациялық пломбаларда қолдануға ұсынылды.

Алынған нәтижелер антеннаны дұрыс таңдау нақты құрылғы құрамындағы орнату жағдайларын ескермей мүмкін еместігін көрсетеді. Нақты құрылымына барынша жақын жағдайда жүргізілетін сынақтар ішкі көлемі шектеулі әрі элементтері тығыз орналасқан навигациялық жүйелерді әзірлеу барысында маңызды кезең болып табылады.

Түйін сөздер: навигациялық пломба, GSM-антенна, жалпақ антенна, тұратын толқын коэффициенті, KCB, GSM 900 диапазоны, антеннаны келісу, логистика.

A.S. Inchin¹, A.Ye. Kulakayeva^{2*}, M.P. Saiganov¹, Sh.S. Bolat¹

¹LLP « Institute of space technique and technology»
05006, Republic of Kazakhstan, Almaty, Kislovodskaya st., 34

²JSC «International Information Technologies University»
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 34/1 Manasa St.

*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

INFLUENCE OF INTEGRATION CONDITIONS ON THE CHARACTERISTICS OF PLANAR GSM ANTENNAS IN AN ELECTRONIC NAVIGATION SEAL

Abstract. This article addresses the practical problem of selecting a GSM antenna for an electronic navigation seal intended for the control and monitoring of cargo transportation. Unlike traditional approaches based on datasheet specifications, the focus is placed on investigating antenna performance within a fully assembled device, taking into account the influence of the plastic enclosure, internal metallic components, and the overall electronic layout.

For this purpose, laboratory tests were conducted on 28 commercially available planar GSM antennas operating in the GSM 900 band under conditions closely approximating real-world operation in a navigation seal. The antenna characteristics were evaluated using a standardized measurement setup with a housing mock-up and a reference antenna. The main comparison criterion was the standing wave ratio, which reflects the quality of antenna matching with the radio module and the level of power losses.

Dimensional constraints of the enclosure, which are critically important for practical integration, were also considered during the selection process. Based on a comprehensive analysis, antennas providing stable communication and sufficient energy efficiency were selected and recommended for use in mass-produced electronic navigation seals.

The obtained results confirm that a proper antenna selection is not possible without considering the installation conditions within a specific device, while testing under conditions close to the actual layout represents an important stage in the development of navigation systems operating under constraints of limited internal volume and dense component integration.

Key words: navigation seal, GSM antenna, planar antenna, standing wave ratio, SWR, GSM 900 band, antenna matching, logistics.

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Инчин – ведущий научный сотрудник, ТОО «Институт космической техники и технологий», города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4799-0828>.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>.

Михаил Петрович Сайганов – старший научный сотрудник, ТОО «Институт космической техники и технологий», города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: samsonenko.a@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6897-638X>.

Шерхан Серікұлы Болат – инженер 2 категории, ТОО «Институт космической техники и технологий», города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: bolat.s@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4213-7515>.

Авторлар туралы мәліметтер

Александр Сергеевич Инчин – жетекші ғылыми қызметкер, Алматы қаласындағы «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Республика Казахстан; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4799-0828>.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>.

Михаил Петрович Сайганов – аға ғылыми қызметкер, Алматы қаласындағы «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Республика Казахстан; e-mail: samsonenko.a@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6897-638X>.

Шерхан Серікұлы Болат – II санаты инженер, Алматы қаласындағы «Ғарыштық техника және технологиялар институты» ЖШС, Республика Казахстан; e-mail: bolat.s@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4213-7515>.

Information about the authors

Alexander Sergeevich Inchin – Leading Researcher, «Institute of space technique and technology» LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: inchin.a@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4799-0828>.

Aigul Yergaliyevna Kulakayeva* – PhD, Associate Professor of the Department of «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications», International Information Technologies University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>.

Mikhail Petrovich Saiganov – Senior Researcher, «Institute of space technique and technology» LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: samsonenko.a@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6897-638X>.

Sherkhan Serikuly Bolat – Engineer of II Category, «Institute of space technique and technology» LLP, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: bolat.s@istt.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4213-7515>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 13.02.2026

Принята к публикации 16.02.2026