

1. Краткое содержание работы

В работе рассмотрены радиотехнические характеристики многолучевых антенных решеток с учетом конструкторских решений для удобства их изготовления. В том числе рассмотрены радиотехнические характеристики антенных систем модулей космического аппарата «Марафон» на его панели, т.е. с учетом взаимного влияния антенных решеток различных диапазонов друг на друга. Выполнен расчет лучей, формируемых диаграммообразующей схемой совместно с антенной решеткой. Представлены данные о потерях, вносимых диаграммообразующими схемами и антенными решетками. Выполнен расчет надежности системы, а также проведена оценка массогабаритных показателей.

Антенная система космического аппарата (КА) «Марафон» состоит из нескольких антенных решеток, необходимых для передачи информации в нескольких частотных диапазонах. Так в состав антенной системы входят модули IoT ISM, IoT S Rx, IoT S Tx.

В работе приведены результаты моделирования антенных решеток (АР) космического аппарата «Марафон». На рисунке 1 показан антенный элемент (АЭ) модуля IoT ISM. На рисунке 2 антенный элемент показан в составе антенной решетки. Проставки между антенной и экраном в конструкции антенного элемента выполнены из диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью 3,2.

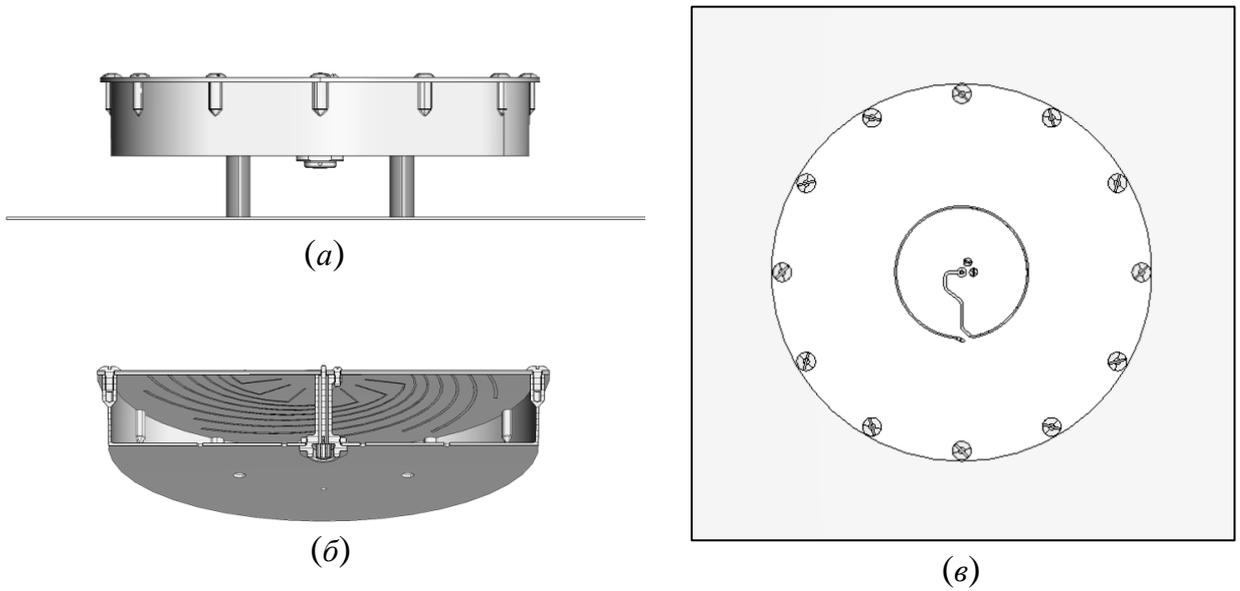


Рисунок 1 – Внешний вид антенного элемента модуля IoT ISM: вид сбоку – (а),
изометрический вид – (б), вид сверху – (в)

Расстояние между элементами антенной решетки принято равным 200 мм.

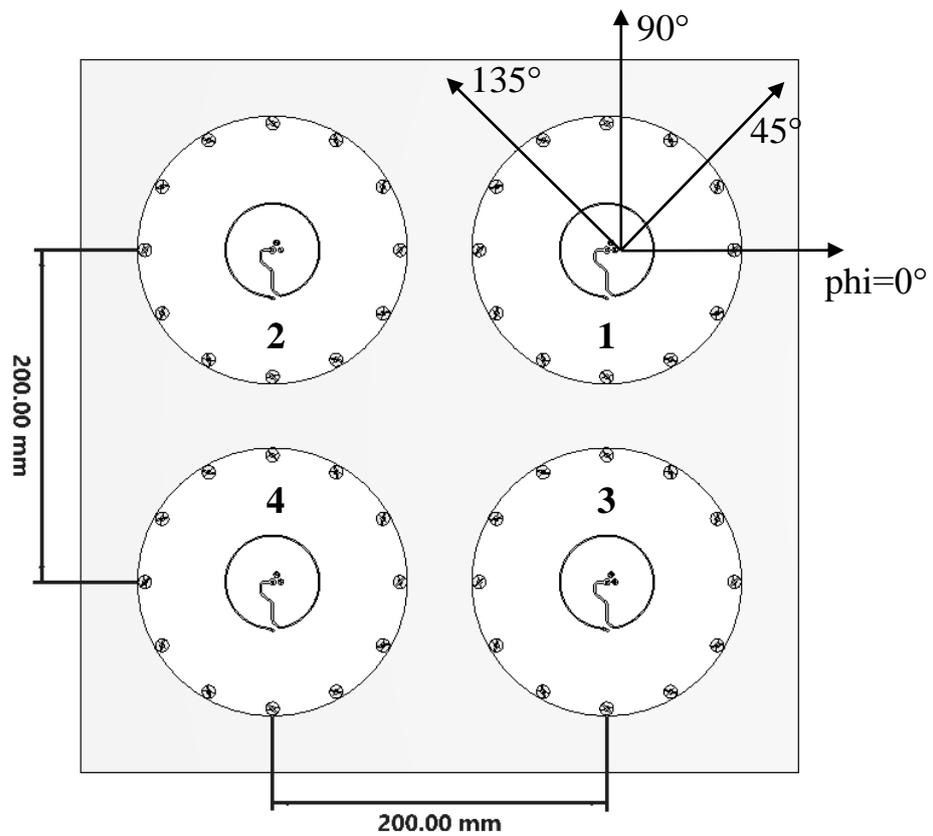
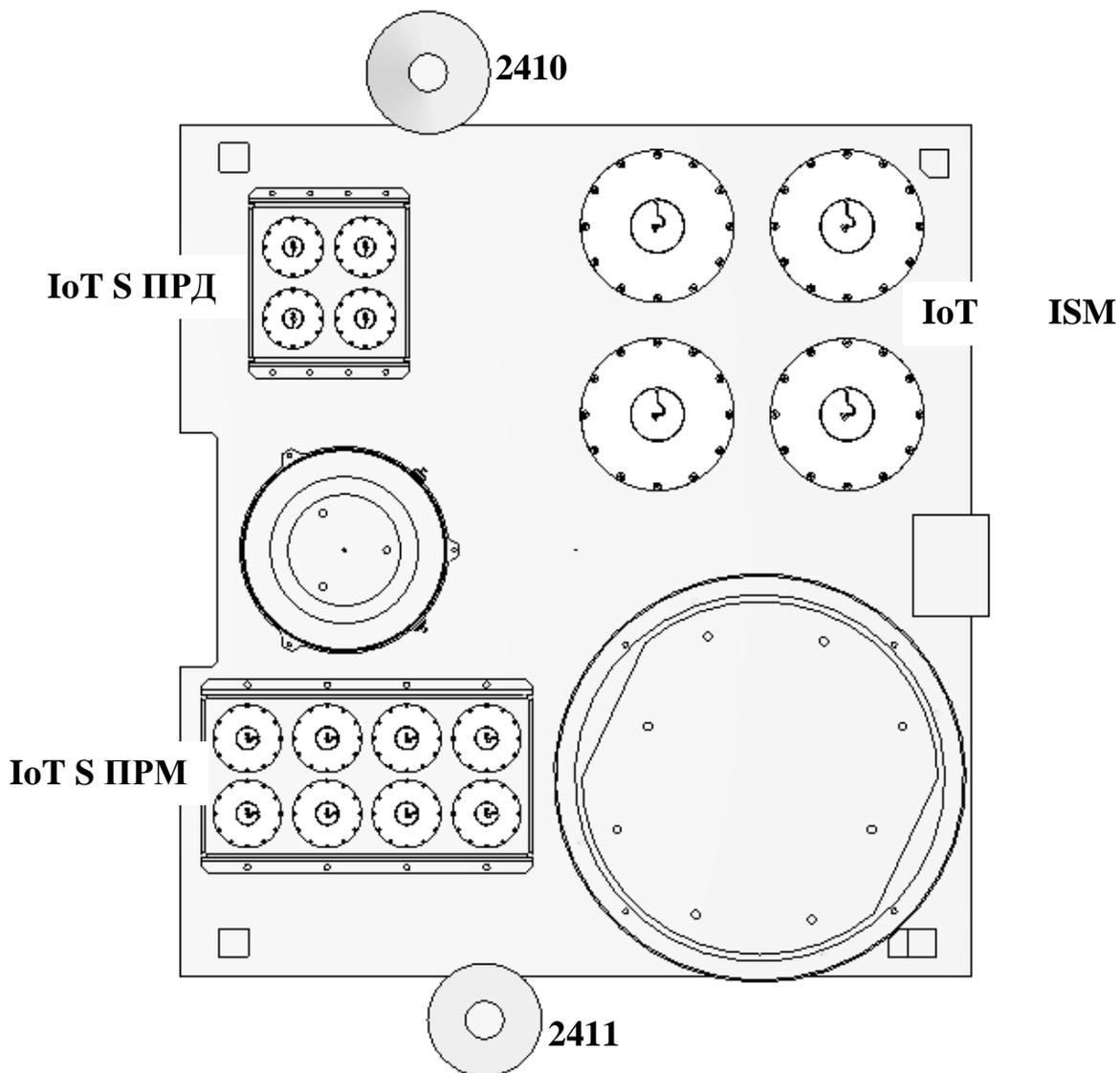


Рисунок 2 – Внешний вид антенной решетки модуля IoT ISM с указанием углов сечений по азимуту ($\phi = 0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; 135^\circ$)

В работе приведены результаты моделирования формируемых лучей при помощи модулей IoT ISM, IoT S ПРД, IoT S ПРМ на панели КА «Марафон» с учетом взаимного влияния антенных решеток друг на друга, а также других антенн и модулей полезной нагрузки согласно рисунку 3. Для упрощения расчетов модулей IoT ISM, IoT S ПРД, IoT S ПРМ, другие антенны и объекты, например, такие как антенны 2410 и 2411, заменены на объемные сплошные металлические фигуры.



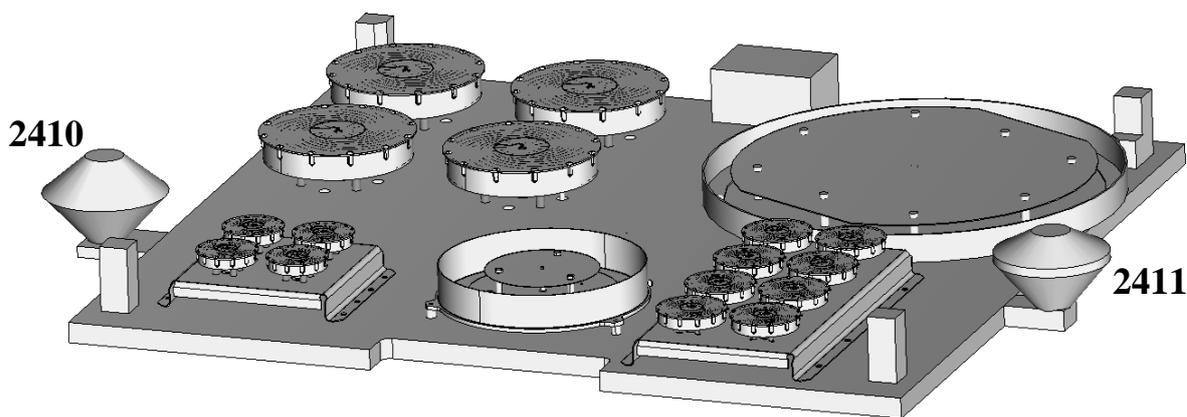


Рисунок 3 – Модули IoT ISM, IoT S ПРМ, IoT S ПРД на панели КА

Как показали проведённые исследования, размещение АР на панели космического аппарата «Марафон» приводит к искажению формы лучей. При этом радиотехнические характеристики остаются на приемлемом уровне, что видно из таблицы 1, в которой проводится сравнение результатов, полученных при моделировании.

Обозначения в таблице 1:

КУ – минимальный КУ из всех лучей;

Мин КУ – минимальный КУ в местах пересечения лучей на краю ЗО;

Мин КЭ – минимальный КЭ по всем лучам;

Сред КЭ – минимальный средний КЭ из всех лучей АР;

$f_{\min}, f_{\text{mid}}, f_{\max}$ – минимальная, средняя и максимальная частоты, заданные по ТЗ.

Для модуля IoT S ПРМ через косую черту записано значение КУ в центральных/крайних лучах.

Таблица 1 – Сводка полученных результатов

Модуль	Модель	КУ			Мин КУ			Мин КЭ			Сред КЭ		
		f_{\min}	f_{mid}	f_{\max}	f_{\min}	f_{mid}	f_{\max}	f_{\min}	f_{mid}	f_{\max}	f_{\min}	f_{mid}	f_{\max}
IoT ISM 863-870 МГц	Одиночная AP	9,7	9,8	9,9	1,7	1,8	2,0	0,63	0,65	0,67	0,78	0,78	0,79
	AP на КА	9,6	9,8	10,0	1,0	1,0	1,2	0,52	0,54	0,56	0,76	0,76	0,77
IoT ISM 915-928 МГц	Одиночная AP	10,1	10,0	9,7	1,9	1,8	1,5	0,74	0,74	0,73	0,83	0,82	0,81
	AP на КА	9,9	9,7	9,5	2,1	1,8	1,5	0,64	0,63	0,63	0,81	0,81	0,81
IoT S ПРМ	Одиночная AP	12,6/ 11,8	12,6/ 11,8	12,5/ 11,7	4,5	4,3	4,0	0,67	0,7	0,72	0,81	0,82	0,82
	AP на КА	12,6/ 11,6	12,6/ 11,4	12,5/ 11,3	4,1	3,9	3,8	0,29	0,34	0,39	0,71	0,72	0,73
IoT S ПРД	Одиночная AP	10,1	10,2	10,2	2,5	2,5	2,5	0,69	0,73	0,75	0,75	0,78	0,81
	AP на КА	10,2	10,4	10,3	2,4	2,3	2,2	0,41	0,45	0,5	0,73	0,76	0,77

2. Научно-техническая идея и практические достижения

Идея разработки состоит в организации глобально распределенной сети интернета вещей на основе спутниковых и наземных каналов для обеспечения телекоммуникационных потребностей.

Основные научно-технические результаты по разработке АЭ, АР и ДОС для применения в качестве полезной нагрузки на КА «Марафон»:

- Проведен выбор материалов, рекомендуемых к применению при изготовлении АР и ДОС;

- Разработаны модели антенных элементов с учетом конструкторских решений;

- Проведена оценка чувствительности РТХ антенных элементов к параметрам используемых материалов и компонентов;

- Выполнено сравнение РТХ ДОС на основе расчетов симметричной и несимметричной микрополосковых линий;

- Разработаны модели АР с учетом конструкторских решений;

- Разработаны модели ДОС с учетом конструкторских решений;

- Проведен расчет лучей, формируемых при помощи моделей АР и ДОС модулей IoT ISM и IoT S ПРМ/ПРД;

- Проведен расчет лучей, формируемых при помощи моделей АР и ДОС модулей IoT ISM и IoT S ПРМ/ПРД, на панели космического аппарата с учетом взаимного влияния АР и элементов полезной нагрузки;

- Проведена оценка РТХ всех модулей антенн полезной нагрузки КА «Марафон»;

- Проведена обработка экспериментальных данных с целью получения лучей, формируемых антенными системами.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что РТХ АР удовлетворяют требованиям ТЗ. Моделирование всех АР на панели КА показывает наличие эффектов взаимного влияния и отражения от окружающих объектов, которые воздействуют на характеристики каждой

из АР. При этом, направления максимумов лучей и их форма искажаются незначительно. Панель КА оказывает большее влияние на поляризационные характеристики, чем на направленные свойства АР.

Практическое достижение проделанной работы состоит в реализации конструктивного воплощения антенной системы полезной нагрузки на основе отечественных материалов и компонент для функционирования в составе низкоорбитального космического аппарата «Марафон».

3. Оценка новизны, отличающая данную работу (актуальность, эффективность, результативность)

Актуальность проведенной работы обосновывается созданием первой глобальной отечественной системы спутниковой связи, обеспечивающей множественный ряд услуг при помощи сервисов интернета вещей.

Новизна разработок в части антенных решений состоит в использовании новой антенны с резонатором, возбуждающим несколько независимых мод колебаний (спирально щелевая антенна с полым экраном) для удовлетворения требований к характеристике направленности и полосе рабочих частот. В составе элемента антенной решетки имеется объемный резонатор (т.н. полый экран), щелевые излучатели переменной электрической длины и питающая микрополосковая линия. Каждая из составных частей антенны определяет характеристики поляризации и частотные свойства. Вариацией системы множества электрофизических параметров антенны возможна адаптация излучателя для разных модулей системы «Марафон IoT».

В части диаграммообразующих схем были разработаны оригинальные конструкции матриц Батлера для антенных решеток, в том числе для решетки 2×4, представляющая собой параллельное соединение обычных 4-лучевых матриц Батлера, соединённых через квадратурные мосты. Все конструкции

предложенных диаграммообразующих схем отличаются компактностью, малым весом и технологичностью.

Новизна предложенных технических решений, описанных выше, позволила реализовать высокоэффективную систему полезной нагрузки КА «Марафон» для организации глобальной сети интернета вещей.

4. Сравнение с аналогами

С использованием разработанного антенного элемента и оптимизации системы из таких элементов (антенной решетки) получены требуемые радиотехнические характеристики в заданной зоне покрытия. Разработанная антенная система имеет ряд преимуществ перед аналогами, в том числе зарубежными. Так, проведенное исследование антенных элементов других типов (печатные, спиральные, турникетные, квадрупольные и др.), в основном применяемых на аналогичных космических аппаратах как отечественного, так и зарубежного производства, показало, что достижение высоких значений коэффициентов усиления и эллиптичности в заданном телесном угле возможно только с применением спирально-щелевой антенны либо массогабаритные показатели или чувствительность к изготовлению у антенн аналогов намного хуже.

Макетирование разработанных антенн и диаграммообразующих схем выполнено с применением фольгированных диэлектрических материалов отечественного производства, кроме того узлы и компоненты коммутации и высокочастотные соединители печатных плат также отечественные. Следовательно, разработанные конструкции реализованы в интересах импортозамещения. Следует отметить, что разработка антенн и диаграммообразующих схем проводилась с учетом условий эксплуатации низкоорбитального космического аппарата, и одним из результатов работы

является формирование отчета об анализе (оценке) надежности системы, согласно которому, требования технического задания также удовлетворены.

5. Социально-экономический эффект

Услуги и сервисы, предоставляемые системой «Марафон IoT» касаются различных направлений социально-экономической сферы. В логистике спутниковый интернет вещей используется для контроля грузоперевозок по морским, воздушным и сухопутным путям. Во избежание чрезвычайных ситуаций при помощи данной системы возможно раннее предупреждение о различных техногенных и природных катастрофах (лесные пожары, землетрясения, цунами и др.). Немаловажным является взаимодействие системы с сервисами российского проекта «Кнопка Жизни», предлагающего экстренный вызов помощи для пожилых людей и детей. Для улучшения экологии и охраны природных ресурсов при помощи «Марафон-IoT» внедряются системы мониторинга атмосферного воздуха и водных ресурсов, системы сбора метеорологической и океанографической информации. Кроме того, системы интернета вещей применяются для контроля различных зданий, трубопроводов, электросетей, гидротехнических сооружений, а также сельском хозяйстве и метеорологии. Немаловажным является использование системы «Марафон IoT» в сфере стремительно развивающихся беспилотных систем, в том числе в создании поля контроля воздушных и морских беспилотных систем для защиты критически важной инфраструктуры.

Множественные направления использования отечественной системы интернета вещей «Марафон IoT» способствуют социально экономическому развитию как регионов, так и РФ в целом.