

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 551.510.535

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ОКОЛОЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ СПУТНИКОВЫХ ОРБИТ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕЁ ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ НА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКУЮ ТЕХНИКУ

В.В. Хегай, В.П. Ким, Р.В. Широков
(ИЗМИРАН)
А.В. Карелин
(ФГУП ЦНИИмаш)

Приведены численные характеристики плазмы околоземной космической среды (ОКС) в области низких спутниковых орбит (в диапазоне высот 200 – 1000 км), т. е. сосредоточенных в F-области и верхней части ионосферы Земли. Характеристики рассчитаны на основе современной эмпирической модели ионосферы IRI для различных уровней солнечной активности, и их можно напрямую использовать для оценок эффектов взаимодействия низкоорбитальных космических аппаратов (КА) с ионосферной плазмой. Кратко обсуждаются основные эффекты возможного воздействия плазмы ОКС на низкоорбитальные КА.

Ключевые слова: околоземная космическая среда, ионосферная плазма, низкоорбитальные космические аппараты.

Технические системы и их элементы могут подвергаться в околоземном космическом пространстве (ОКП) воздействию разнообразных факторов. За нижнюю границу околоземного космического пространства можно принять высоту 80 км. С этой высоты начинается интенсивное разрушение («сгорание») метеоритов, а в качестве верхней границы может служить граница земной магнитосферы, которая на дневной стороне расположена, в среднем, на расстоянии примерно 10 – 12 земных радиусов R_e от центра Земли, а на ночной стороне вытянута в антисолнечном направлении на многие десятки R_e .

Основными факторами, которые могут оказывать воздействие на функционирование технических систем в околоземном космическом пространстве, являются: околоземная космическая среда (ОКС), солнечное электромагнитное излучение различного частотного диапазона (от инфракрасного до рентгеновского), солнечные корпускулярные потоки, галактические и солнечные космические лучи, метеориты, межпланетные пылевые частицы.

Спектр эффектов воздействия может варьироваться от прямого механического повреждения в результате столкновения с метеорным телом до переключения одного бита цифровой памяти компьютерного чипа в результате попадания в него частицы высокой энергии. Ниже будут обсуждаться только вопросы, связанные с воздействием на технические системы околоземной космической среды и (косвенно) солнечного ультрафиолетового излучения.

ОКС в настоящее время включает в себя не только естественную природную среду, но и замет-

ное искусственное вкрапление в виде целого ряда функционирующих космических аппаратов (КА) различного назначения и огромного количества фрагментов технических систем, прекративших свое существование (так называемого «космического мусора»). В дальнейшем под ОКС будет подразумеваться среда естественного происхождения.

Естественная ОКС представляет собой в основном газ, состоящий из нейтральных и заряженных частиц (электронов и ионов), пронизанный геомагнитным полем. Она также включает определенное количество частиц микро- и наномасштабов. Заряженные частицы ОКС делятся на тепловую и энергичную компоненты. Энергичная компонента, в свою очередь, подразделяется на высыпающиеся авроральные частицы и захваченные частицы радиационного пояса. Тепловая компонента ОКС представлена холодной плазмой ионосферы и плазмосферы, а также горячей плазмой плазменного слоя магнитосферы. Основным исходным источником заряженных частиц ОКС являются крайнее ультрафиолетовое излучение Солнца и солнечные корпускулярные потоки. Эти же факторы в значительной мере контролируют вариации пространственно-временного распределения нейтральных частиц [1].

Основные факторы ОКС, воздействующие на КА

Воздействие околоземной космической среды на КА может проявляться самым различным образом. Наличие нейтральной атмосферы вызывает аэродинамическое торможение КА, которое определяет время нахождения КА в ОКС. Вариации

плотности нейтрального газа могут приводить к заметному возмущению параметров орбиты КА. Атомарный кислород, являющийся основным компонентом нейтральной атмосферы в интервале высот, где летают низкоорбитальные КА, может, в силу своей высокой реакционной химической способности, оказывать негативное воздействие на свойства поверхностей элементов КА, сделанных из определённых типов материалов. Высокоэнергичные заряженные частицы способны вызывать: накопление электрических зарядов внутри изоляционных материалов коаксиальных линий КА, повреждение компьютерной памяти и полупроводниковой микроэлектроники. В функциональном аспекте особую чувствительность к воздействию заряженных частиц ОКС проявляют солнечные батареи и сенсоры радиоэлектронных устройств.

В настоящей работе обсуждаются вопросы, связанные исключительно с холодной плазмой ионосферы применительно к случаю низких спутниковых орбит. Во-первых, ионосферная плазменная составляющая ОКС, взаимодействующая с КА, приводит к их электризации (заряжению), в результате которой могут возникать дуговые разряды. Во-вторых, плазменные неоднородности (в области низких орбит – возмущения в ионосфере Земли) приводят к искажению сигналов радионавигационных систем при попадании КА в такую неоднородность, что влечёт за собой затруднения в определении точного местоположения КА и даже возможность потери управления КА [2].

Электризация КА на низких орбитах, высоты которых ограничены интервалом от 200 до 1000 км, происходит за счёт взаимодействия КА с холодной плазмой и с потоками энергичных электронов, высыпающихся на авроральных широтах, если орбита КА проходит через полярные области. При этом КА с полярными орбитами могут заряжаться гораздо сильнее, чем КА, орбиты которых ограничены средними и низкими широтами. Радиус Дебая на высотах низкоорбитальных КА составляет от нескольких мм до нескольких см. Фотоэлектронная эмиссия не вносит значительного вклада в электризацию КА. Большое значение имеет сверхзвуковое относительное движение КА сквозь окружающую плазму, в результате которого вокруг КА формируется область сильно возмущенной плазмы существенных размеров. На фронте этой области образуется ударная волна. В авроральных зонах в процессе электризации КА играет роль геомагнитное поле.

Наиболее серьёзным эффектом электризации КА является, как уже упоминалось выше, электростатический разряд. Электрические разряды могут вызывать сбои в работе логических полупроводниковых элементов и выдачу ошибочных управляющих сигналов в электронных устройствах. Они также приводят к деградации сенсоров и панелей солнечных батарей, что может уменьшать количество генерируемой энергии. Разряды также способны вызывать существенные физические повреждения на поверхностях КА. В результате дугового разряда происходит локальный нагрев и потери материала, что может нанести структурный и функциональный ущерб элементам КА.

Воздействие ионосферных возмущений на функционирование радиоэлектронных компонент КА обусловлено тем, что при попадании КА в область такой неоднородности, когда концентрация плазмы изменяется на порядки величины по сравнению с фоном, в десятки раз изменяется толщина экранирующего плазменного слоя (ЭПС), соответственно могут наблюдаться искажения характеристик принимаемого или передаваемого бортовой аппаратурой КА радиосигнала.

В любом случае необходимо знать фоновые параметры плазмы ОКС для того, чтобы оценивать возможные сценарии взаимодействия КА с ионосферной плазмой в указанном интервале высот.

Расчётные параметры плазмы ОКС в области низких спутниковых орбит в средних широтах для различных уровней солнечной активности

При стандартном описании ионосферы выделяют три области вертикальной структуры ионосферы, которые в порядке увеличения высоты определяют как *D*, *E* и *F*-области. Наиболее важной из них, с точки зрения рассмотрения взаимодействия КА с плазмой, является *F*-область. Именно внутри этой области заключены все низкоорбитальные орбиты КА. Пространственно-временное распределение плазмы в *F*-области ионосферы стало постоянно исследоваться после появления наземных станций зондирования ионосферы, задолго до появления спутниковых измерений. В результате общая морфология *F*-области ионосферы и основные её характеристики хорошо изучены к настоящему времени. Концентрация электронов в *F*-области сильно изменчива, при этом на общие аномалии в её широтно-долготной структуре и поведении накладываются суточные и сезонные вариации, а также вариации, обусловленные солнечной активностью. Выше основного максимума *F*-области

ионосферы, электронная концентрация монотонно убывает.

К настоящему времени построены эмпирические модели ионосферы. Основной моделью ионосферы, которая используется в настоящее время в практических целях, является эмпирическая международная модель ионосферы International Reference Ionosphere – IRI [3]. Эта компьютерная модель, основанная главным образом на данных наземного зондирования ионосферы, даёт концентрацию и температуру электронов и ионов в зависимости от долготы, широты, высоты (в интервале от 65 до 1000 км), солнечной активности, конкретной даты и времени (местного и мирового). База входных данных модели непрерывно пополняется наряду с совершенствованием её структуры.

Прежде чем перейти к описанию характеристик ионосферной плазмы в указанном интервале высот и широт, необходимо прояснить физический смысл такого параметра плазмы, как радиус Дебая, непосредственно связанного с одной стороны с концентрацией и температурой плазмы, а с другой стороны, определяющего толщину ЭПС.

Когда проводники, находящиеся под напряжением (т. е. имеющие некоторый потенциал относительно окружающей среды), находятся в плазме околоземной космической среды, их положительно заряженные поверхности собирают электроны, а отрицательно заряженные поверхности собирают положительные ионы, при этом движение зарядов подчиняется уравнению Пуассона $\nabla^2\varphi = -4\pi\rho$, в котором φ – потенциал, а ρ – плотность заряда.

Космический аппарат, двигаясь через окружающую плазму космического пространства, достигает электрического равновесия с плазмой, когда он приобретает такой заряд, при котором суммарный ток на весь аппарат в целом и на каждую из его диэлектрических поверхностей становится равным нулю. Это условие равновесия определяет поверхностный потенциал КА относительно окружающей плазмы. Поверхность КА может состоять из проводящих и/или диэлектрических материалов. Для проводящих поверхностей равновесие устанавливается глобально (в целом), в то время как на диэлектрических поверхностях оно достигается локально, от точки к точке. На низких околоземных орбитах потенциал КА относительно окружающей его плазмы зависит от её характеристик. При этом замкнутая область пространства, в которую заключен КА и внутри которой наблюдаются вызванные самим КА заметные отличия от величины свободного потенциала окружающей космической

плазмы (т. е. потенциала космической плазмы в этой области в отсутствие КА) называется экранирующим плазменным слоем (ЭПС). Если в некоторой точке пространства, заполненного космической плазмой, существует макроскопически малый источник возмущения потенциала φ_0 , то распределение потенциала относительно этой точки может быть описано выражением

$$\varphi = \varphi_0 \exp(-r/\lambda_D). \quad (1)$$

Потенциал экспоненциально спадает по своей абсолютной величине с увеличением расстояния от этой точки пространства r с характерным масштабом λ_D , который называется радиусом Дебая (или длиной Дебая). Радиус Дебая и есть тот масштаб, который определяет толщину ЭПС, окружающего источник возмущения потенциала, т. е. расстояние от источника возмущения потенциала, на котором абсолютная величина возмущения потенциала падает в e раз. Величина радиуса Дебая определяется следующим выражением:

$$\lambda_D = (\varepsilon_0 k T_e / e^2 n_e)^{1/2}, \quad (2)$$

где $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T_e и n_e – температура и концентрация электронов соответственно. Отметим, что уравнения (1) и (2) применимы только при условии, что величина возмущающего потенциала мала и уравнение Пуассона может быть линеаризовано. В случае высокой степени электризации, когда величина возмущающего потенциала велика, необходимо использовать нелинейную теорию.

Уравнение (2) показывает, что дебаевская длина варьирует в зависимости от температуры электронов и концентрации плазмы, которые могут сильно изменяться по своей величине. Для изучения эффектов взаимодействия КА с окружающей плазмой необходимо знать параметры плазмы, которые определяют эти эффекты. В таблице представлены основные фоновые параметры плазмы для высот 300 и 800 км в дневной летней ионосфере средних широт, вычисленные в соответствии с моделью IRI.

Заключение

Показано, что основные возможные эффекты воздействия ионосферной плазмы на низкоорбитальные КА двоякого рода. Во-первых, ионосферная плазменная составляющая ОКС, взаимодействующая с КА, приводит к их электризации,

Параметры плазмы для низкой околоземной орбиты

Высота, км	Высокая солнечная активность		Низкая солнечная активность		Умеренная солнечная активность	
	300	800	300	800	300	800
T_e, K	2500	3400	2500	3400	2500	3400
T_i, K	1200	2300	970	2300	1100	2300
$n_{e,i}, M^{-3}$	$8,8 \times 10^{11}$	$7,7 \times 10^{10}$	$2,4 \times 10^{11}$	$1,7 \times 10^{10}$	$5,8 \times 10^{11}$	$4,2 \times 10^{10}$
$v_{e,i}, M/c$	$2,77 \times 10^5$	$3,24 \times 10^5$	$2,77 \times 10^5$	$3,24 \times 10^5$	$2,76 \times 10^5$	$3,24 \times 10^5$
$v_{i,i}, M/c$	$1,12 \times 10^3$	$1,55 \times 10^3$	$1,00 \times 10^3$	$1,55 \times 10^3$	$1,05 \times 10^3$	$1,55 \times 10^3$
ω_{pe}, c^{-1}	$5,32 \times 10^7$	$1,58 \times 10^7$	$2,78 \times 10^7$	$7,27 \times 10^6$	$4,32 \times 10^7$	$1,16 \times 10^7$
ω_{pi}, c^{-1}	$3,06 \times 10^5$	$8,83 \times 10^4$	$1,62 \times 10^5$	$3,95 \times 10^4$	$2,50 \times 10^5$	$6,41 \times 10^4$
ω_e, c^{-1}	$7,82 \times 10^6$	$6,58 \times 10^6$	$7,82 \times 10^6$	$6,58 \times 10^6$	$7,82 \times 10^6$	$6,58 \times 10^6$
ω_i, c^{-1}	$2,65 \times 10^2$	$2,23 \times 10^2$	$2,65 \times 10^2$	$2,23 \times 10^2$	$2,65 \times 10^2$	$2,23 \times 10^2$
ρ_e, M	$3,54 \times 10^{-2}$	$4,93 \times 10^{-2}$	$3,54 \times 10^{-2}$	$4,93 \times 10^{-2}$	$3,53 \times 10^{-2}$	$4,92 \times 10^{-2}$
ρ_i, M	4,23	6,98	3,79	6,98	3,96	6,98
λ_D, M	$3,68 \times 10^{-3}$	$1,45 \times 10^{-2}$	$7,04 \times 10^{-3}$	$3,15 \times 10^{-2}$	$4,52 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-2}$
v_{ee}, c^{-1}	$2,72 \times 10^2$	$1,49 \times 10^1$	$7,41 \times 10^1$	3,16	$1,81 \times 10^2$	8,08
v_{ii}, c^{-1}	4,5	$1,40 \times 10^{-1}$	1,75	$2,81 \times 10^{-2}$	3,67	$7,41 \times 10^{-2}$

П Р И М Е Ч А Н И Е. $\rho_{e,i}$ – гирорадиусы электронов и ионов; $\omega_{e,i}$ – ларморовские частоты электронов и ионов; $v_{e,i}$ – тепловые скорости электронов и ионов; ω_{pe} – частота плазменных колебаний электронов; v_{ee} – частота столкновений электронов с электронами; v_{ii} – частота столкновений ионов с ионами.

в результате которой могут возникать дуговые разряды. Во-вторых, плазменные неоднородности (в области низких орбит – возмущения в ионосфере Земли) приводят к искажению сигналов радионавигационных систем при попадании КА в такую неоднородность, что влечёт за собой затруднения в определении точного местоположения КА и даже возможность потери управления КА.

В таблице представлены результаты расчётов основных параметров ионосферной плазмы для летних условий в средних широтах для различных уровней солнечной активности на основании со-

временной эмпирической модели IRI, которые можно использовать для проведения прямых оценок при расчётах эффектов взаимодействия низкоорбитальных КА с ионосферной плазмой.

Литература

1. Альперт Я. Л. Волны и искусственные тела в приземной плазме / Я. Л. Альперт. – М. : Наука, 1974. – 214 с.
2. Bourdeau R. E. On the interaction between a spacecraft and an ionized medium. – Space Science Review, 1963. – V. 1. – №. 4. – P. 719 – 728.
3. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html. – International Reference Ionosphere (IRI).

Поступила в редакцию 21.02.2014

Валерий Варламович Хегай, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, т. (495) 851-97-80.
Виталий Павлович Ким, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, т. (495) 851-97-80.
Руслан Владимирович Широков, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, т. (495) 851-97-80.
Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела, т. (985) 121-84-49, e-mail: avkarelin@mail.ru.