

УДК 621.391.82, 533.922

О.В. Шефер

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## ФОРМУВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ КОСМІЧНИМ АПАРАТОМ ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ПЛАЗМИ УДАРНОЇ ХВИЛІ

У статті розглянуто спосіб утворення завадостійких каналів зв'язку із пониженою щільністю іоносферної плазми для КА. В якості інструментарію утворення таких каналів запропоновано використання штучно створеної плазми локалізованого розряду. Встановлено, що даній плазмі властиві висока інтенсивність випромінювання, достатньо великі розміри та однорідність, як у повздовжньому, так і в радіальному напрямку, відсутність амбіполярної дифузії електронів та іонів. Зроблено пропозиції щодо розширення діапазону радіозв'язку із мінімальними енерговитратами.

**Ключові слова:** іоносфера, завадостійкість, космічний апарат, супутникові телекомунікації, ударна хвиля, плазма, локалізований розряд.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Активна ділянка виведення КА на орбіту найбільш напружена з усіх етапів польоту [1]. Під час входження КА на гіпершвидкості в іоносферу, навколо нього виникає потужна ударна хвиля іонізації. Утвориться нерівномірна за товщиною та щільністю плазмова оболонка, котра змінює характеристики сигналів, впливає на поширення електромагнітних хвиль та погіршує, або повністю перешкоджає радіозв'язку [2]. Для вирішення поточних практичних завдань, наприклад, видачі керуючих команд на КА, отримання оперативного зв'язку із КА, супроводження КА, необхідно забезпечити безперервну телеметрію з останнім. Оскільки плазма утворює радіонепроникне середовище навколо КА, то вирішення зазначених завдань надзвичайно ускладнюється. Тому вказаній проблемі підвищення завадостійкості телекомунікацій приділяють велику увагу науковці багатьох «космічних» країн світу [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні безальтернативним підходом зв'язку із КА є застосування систем супутникових телекомунікацій (СТ) [4]. Принцип дії СТ базується на використанні супутникових ретрансляторів сигналу (СРС), через які здійснюється зв'язок із наземними станціями та центром управління польотом. Окремі станції зв'язку можуть розташовуватись на поверхні Землі, в атмосфері, або космосі. В кожному із цих пунктів знаходиться приймально-передавальна радіостанція зв'язку.

Існуючі методи розв'язання даного завдання підвищення завадостійкості зв'язку із КА, базуються на підсиленні за потужністю вхідних сигналів СРС та перенесенні їх спектрів на інші частоти [3–5].

Однак між деякими СТ відбувається вельми складна обробка сигналів, задля зменшення перехресних завад між сигналами від різних СРС та підвищення завадостійкості системи в цілому.

Для забезпечення якісного зв'язку в системі телекомунікацій, СРС змушені розміщувати на кількох супутниках, що знаходяться на різних орбітах [4]. Даний підхід значно підвищує вартість зв'язку із КА, суттєво погіршує електромагнітну сумісність радіотехнічних систем, при порівняно невисокій надійності та якості телеметрії, призводить до зниження дальності дії телеметрії, у випадку впливу зовнішніх сигналів завад, як зазначено у [6].

Автором [7] пропонується спосіб передачі інформації через плазму, заснований на одночасному впливові на плазму електронним потоком, акустичної хвилею і інформаційним сигналом. Для отримання високоенергетичних електронів (близько 1 МеВ) використовується радіоактивне покриття (наприклад, полоній-210), що міститься в теплозахисному шарі на всій його глибині в області випромінювання радіосигналу. При цьому зміна властивостей плазми пов'язана з характеристиками плазми, при яких діелектрична проникність стає більше одиниці, тому з'являється можливість проходження електромагнітної хвилі з частотою, меншою за плазмову частоту.

Але запропоновані в [7; 8] загальні підходи до забезпечення передачі інформації через плазму не враховують умов, за яких відбувалися б мінімальні спотворення і загасання сигналу.

**Метою роботи** є дослідження можливостей якісної телеметрії із КА через плазмову оболонку, шляхом впливу на неї штучно створеним потоком елементарних частинок.

Досягнення поставленої мети можливе шляхом дослідження елементарних процесів, котрі відбуваються в плазмі, та розроблення на основі результатів досліджень методу утворення завадостійких каналів зв'язку із пониженою щільністю плазми. Це дозволить безперешкодно проходити електромагнітній хвилі, котра несе інформацію, через шар плазми ударної хвилі.

### Виклад основного матеріалу

Розташування поблизу плазмової оболонки КА джерела квазінейтральної штучної плазми супроводжується збудженням в ній коливань щільності заряду. Зазначені коливання мають власну частоту. Цей процес взаємодії має хвилеподібний характер та призводить до появи вільних каналів («вікон») в плазмі зі зниженою щільністю. В якості джерела плазми зазвичай використовують анодну (позитивну) білянку розряду, що жевріє. Але плазма позитивного стовпа, разом із всіма перевагами [9], має один із суттєвих недоліків – для її отримання необхідний значний енерговнесок, пов'язаний із потужним та вагомим джерелом. Оскільки для КА вагу кожного функціонального елемента намагаються мінімізувати, даний метод є неприйнятним.

Незважаючи на те, що інтенсивність випромінювання плазми від'ємного світіння, у порівнянні з плазмою позитивного стовпа, значно вища, а енерговнесок в одиницю об'єму цієї плазми нижчий, практичне використання даної плазми набагато менше, ніж у плазми позитивного стовпа, внаслідок того, що її розміри дуже малі. З метою усунення вказаних недоліків та використання позитивних властивостей плазми від'ємного випромінювання, були досліджені причини виникнення амбіполярної дифузії та умови забезпечення її однорідності у всьому об'ємі від'ємного випромінювання.

Питання катодної області розряду, що жевріє [10], з урахуванням  $\nu$ -процесів показують визначальний вплив від'ємного випромінювання на підтримку стаціонарності розряду, як у нормальному, так і в аномальному режимі. У плазмі цього випромінювання відбуваються інтенсивні процеси іонізація та рекомбінація та, згідно із дослідженнями [9], характер даних процесів суттєво відрізняється від аналогічних процесів, що протікають у плазмі від'ємного стовпа розряду, що жевріє. Інтенсивність випромінювання плазми від'ємного світіння в три – чотири рази вище випромінювання плазми позитивного стовпа [9; 10].

Дослідження плазми від'ємного випромінювання, котра утворена у розряді з плоскпаралельним проміжком, встановили ряд неоднорідностей як у повздовжньому, так і в радіальному напрямках. Згідно досліджень [9] встановлено, що в катодній частині від'ємного випромінювання концентрація

позитивних іонів  $n_i$  більше концентрації електронів  $n_e$  ( $n_i > n_e$ ), а в анодній частині навпаки –  $n_e > n_i$ . Суттєвий внесок у неоднорідність розподілу потенціалу простору  $V_{pl}$  напруженості електричного поля  $E$  енергії електронів  $E_e$  та іонів  $E_i$ , концентрації  $n_e$  та  $n_i$  та інших параметрів цієї плазми вносить амбіполярний процес дифузії електронів та іонів до обмежуючих стінок розрядної камери. Наприклад, в роботах [9; 10] показано, що через амбіполярну дифузію порушується симетричний розподіл електронів. Дана дифузія та супутня рекомбінація зарядоносіїв на стінках розрядної камери вносять збурення в елементарні процеси, призводять до виникнення неоднорідностей у плазмі та розсіюють енергію розряду.

Аналіз емісії плазми показує, що  $\nu$ -процеси проходять тільки в катодній та анодній торцевій поверхні плазми від'ємного випромінювання. З циліндричною поверхнею плазми відбувається амбіполярна дифузія зарядоносіїв, котра зменшує ефективність плазми. Якщо ж створити також із бічної поверхні  $\nu$ -процеси, то втрати зарядоносіїв різко скорочуються, а ефективність плазми суттєво збільшиться.

Припустимо, що біля граничної стінки вакуумної камери розташовані три однакові стрижневі електроди на рівних відстанях один від одного та від вакуумної стінки (рис. 1).

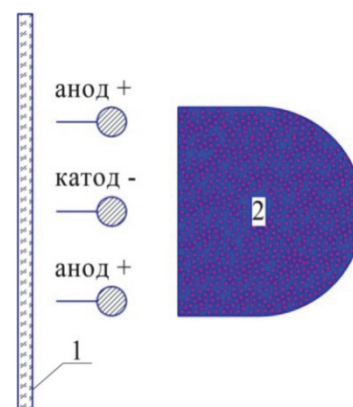


Рис.1. Розряд, що жевріє, з ускладненими умовами у обмежувальній поверхні вакуумної камери:

- 1 – обмежувальна поверхня вакуумної камери;
- 2 – плазма загального від'ємного випромінювання

Ця відстань менше товщини темного кружкового простору. Середній електрод виконує роль катода, а два крайніх – роль анода. За умови тиску 1,33 Па аргону та ввімкненні анодної напруги у вказаному електродному проміжку встановлюється розряд, що жевріє, без позитивного стовпа.

Єдиною зоною випромінювання в даному розряді є від'ємне світіння, що жевріє, котре розташовано справа відносно електродів та точно навпроти

катода по всій його довжині. В поперечному розрізі форма від'ємного випромінювання має вигляд напівеліпса, витягнутого до центру розрядного пристрою.

Між катодом та даним випромінюванням встановлюється темний круксовий простір, а між анодами та випромінюванням – фарадеевий простір. Зі зростанням анодної напруги плазма від'ємного випромінювання збільшує свої розміри та розповсюджується в основному вздовж нормалі від обмежуючої стінки вакуумної камери. В просторі між обмежуючими стінками та електродами розрядних зон немає, оскільки за вказаного тиску та відстані, створені умови ускладненого розряду. Із від'ємного випромінювання зарядносії не можуть пройти через електроди до обмежуючої стінки внаслідок того, що проходячи через сильне електричне поле між електродами, вони потрапляють або на катод, або на анод. Внаслідок цього плазма від'ємного випромінювання віддалена від обмежуючої стінки та не взаємодіє з нею. Якщо розташувати стрижневі аноди та катоди, котрі чергуються, вздовж увігнутої або випуклої поверхні розрядної камери, отримаємо, за умов запалювання розряду, загальне від'ємне випромінювання від багатьох елементарних розрядів.

Розташування великої кількості стрижневих анодів та катодів, що чергуються між собою, по колу вздовж внутрішньої поверхні розрядної трубки створює розрядний проміжок у вигляді циліндричної порожнини (рис. 2).

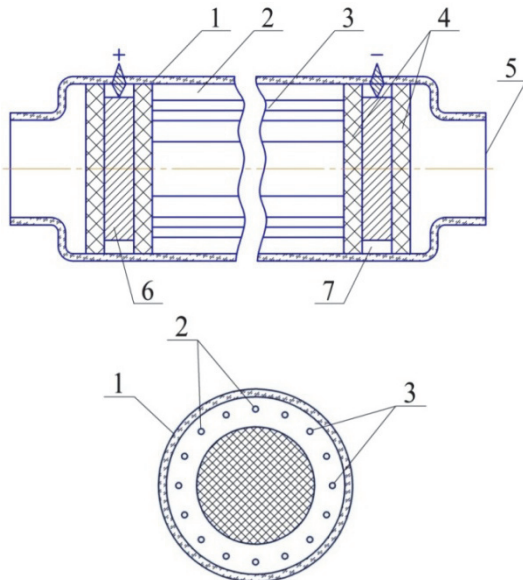


Рис. 2. Пристрій для отримання плазми загального від'ємного випромінювання великих розмірів:

- 1 – вакуумна камера; 2 – аноди; 3 – катоди;
- 4 – ізолятори електродотримачів; 5 – торцеві вікна із кварцового скла; 6 – анодотримачі; 7 – катодотримачі;
- 8 – плазма загального від'ємного випромінювання

У цьому випадку пристрій являє собою систему стрижневих анодів та катодів довжиною 0,19 м, роз-

ташованих по колу діаметром  $6,2 \cdot 10^{-2}$  м в прозорій газорозрядній трубці довжиною 0,28 м та діаметром  $7,2 \cdot 10^{-2}$  м. Кожна пара сусідніх електродів (анод та катод) являє собою окремий розрядний проміжок уздовж усього пристрою. Після ретельної вакуумної обробки газорозрядний пристрій заповнювався одним із інертних або молекулярних газів. Тиск наповнюваного газу, відстань між сусідніми електродами та від електродів до обмежуючих стінок були підібрані так, щоб відповідати умовам ускладненого розряду.

Внаслідок цього, за умови ввімкнення анодної напруги в межах 380–500 В, в газорозрядному пристрої встановлюється слабоаномальний розряд, що жевріє, розрядні зони котрого розташовані тільки у внутрішній зоні розрядного проміжку. За умов усталеного режиму, в кожному розряді було чітко видно лише одну область випромінювання – від'ємне випромінювання, що жевріє. В поперечному перерізі форма кожного від'ємного випромінювання має вигляд напівеліпса, витягнутого до центру. Оскільки всі від'ємні випромінювання були ідентичні та будь-яке із них знаходилось між такими ж сусідніми, воно непомітно зливалось в одне загальне випромінювання, котре має форму циліндричного стовпа, діаметр якого складає більше половини діаметра розрядного проміжку. Не зважаючи на те, що окремо від'ємне випромінювання кожного розряду не досягало осі пристрою, під час запалювання всіх розрядів загальне випромінювання заповнювало всю центральну область уздовж усього пристрою.

В процесі розряду плазма загального випромінювання добре спостерігається безпосередньо через бічну поверхню вільного торця розрядного пристрою. Чітко проглядаються кордони плазми загального випромінювання та канал зі зниженою щільністю (рис. 3; 4).

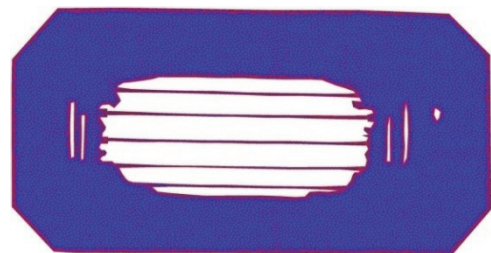


Рис. 3. Розряд із плазмою загального випромінювання. Вигляд через бічну циліндричну скляну прозору вакуумну камеру

Для товщини плазми  $\delta = 10$  см зменшення щільності плазми в утворених радіоканалах відбувається в 20-25 разів. Час існування завадостійкого каналу в плазмі залежить від висоти та швидкості руху КА. Оскільки швидкість КА зменшується, найбільша щільність плазми очікується на висоті 75 км,

де вона досягає  $n_e = 10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Для висот 45–120 км цей час лежить в межах 80–20 мкс, що дозволяє розширити діапазон радіозв'язку із мінімальними енерговитратами.

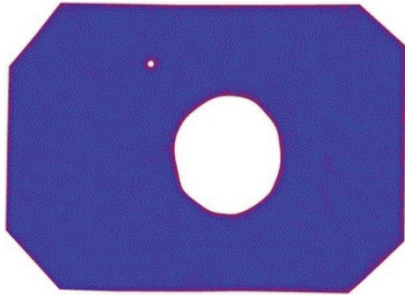


Рис. 4. Локалізований розряд, котрий має канал зниженої щільності.  
Вигляд із торця вакуумної камери

### ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень, експериментально виявлено появу каналу зниженої щільності плазми. Дані канали запропоновано в якості надійного шляху проходження електромагнітних інформаційних хвиль зв'язку із КА.

В якості інструментарію досліджено можливість використання плазми локалізованого розряду з високою інтенсивністю випромінювання, достатньо великих розмірів, без амбіполярної дифузії електронів та іонів, достатньо однорідної, як у повздовжньому, так і в радіальному напрямку. Висока інтенсивність локалізованого розряду поєднується із мінімальними енерговитратами на його утворення.

### Список літератури

1. Тейлор М. Радиосвязь через плазму при входе ракеты в атмосферу [Текст] / М. Тейлор // Зарубежная электроника. – 1968. – № 2 – С. 76-89.

2. Гинзбург В.А. Распространение электромагнитных волн в плазме [Текст] / В.А. Гинзбург. – М: Физматлит, 1960. – 340 с.

3. Izhovkina N.I. Plasma inhomogeneities and radio-wave scattering in experiments with electron pulses in the ionosphere / N.I. Izhovkina, N.S. Erokhin, L.A. Mikhaylovskaya // Geomag. and Aeronomy. – 2014. – Vol. 54, no 1. – P. 73-81.

4. Макаренко С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты [Текст]: монография / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

5. Домрачева К.О. Загальна порівняльна оцінка завадостійкості телекомунікаційних систем [Текст] / К.О. Домрачева // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – №3(43). – С. 83-89.

6. Кучер Д.Б. Построение моделей неравновесных состояний электронов в полупроводниковой плазме для сверхпроводящей защиты радиотехнических средств ВСУ [Текст] / Д.Б. Кучер, А.И. Фык // Системы озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 80-82.

7. Литвина З.Ю. О возможности передачи информации через плазму [Текст] / З.Ю. Литвина // Системы обработки информации. – X: ХУПС, 2007. – Вып. 9(67). – С. 127-128.

8. Коняхин Г.Ф. Устройство для передачи информации со спускаемого летательного аппарата [Текст] / Г.Ф. Коняхин, А.Ю. Мелашенко, З.Ю. Литвина // Системы обработки информации. – 2001. – Вып. 5(15). – С. 201-204.

9. Smirnov V.M. Theory of Gas Discharge. Plasma Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Switzerland, 2015. – 423 p.

10. Голант В.Е. Основы физики плазмы [Текст] / В.Е. Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров. – СПб.: Лань, 2011. – 448 с.

Надійшла до редколегії 19.04.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ФОРМИРОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КАНАЛА СВЯЗИ С КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

А.В. Шефер

В статье рассмотрен способ образования помехоустойчивых каналов связи с пониженной плотностью ионосферной плазмы для КА. В качестве инструментария образования таких каналов предложено использование искусственно созданной плазмы локализованного разряда. Установлено, что данной плазме свойственны высокая интенсивность излучения, достаточно большие размеры и однородность, как в продольном, так и в радиальном направлении, отсутствие амбиполярной диффузии электронов и ионов. Сделаны предложения по расширению диапазона радиосвязи с минимальными энергозатратами.

**Ключевые слова:** ионосфера, помехоустойчивость, космический аппарат, спутниковые телекоммуникации, ударная волна, плазма, локализованный разряд.

### NOISE IMMUNITY COMMUNICATION CHANNEL WITH THE SPACECRAFT FORMATION BY REDUCING THE PLASMA DENSITY SHOCK WAVE

O. Shefer

The method of noise-immune communication channels with a reduced ionospheric plasma density for spacecraft formation is considered in the article. As a tool for the formation of such channels, the use of artificially created plasma of localized discharge is proposed. It is established that this plasma is characterized by high radiation intensity, rather large dimensions and uniformity, both in the longitudinal and radial directions, the absence of electrons and ions ambipolar diffusion. Proposals have been made to expand the range of radio communications with minimal energy costs.

**Keywords:** ionosphere, noise immunity, spacecraft, satellite telecommunications, shock wave, plasma, localized discharge.