

УДК 623.454.838

Г.В. Єрмаков, Р.В. Воробйов, О.Г. Коробка, О.П. Кулік

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ АНТЕННИХ СИСТЕМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДО ВПЛИВУ СВІТІННЯ ХМАРИ МАГНІТОСФЕРНОГО ЯДЕРНОГО ВИБУХУ

Наводиться постановка завдання оцінювання впливу одного з уражаючих факторів магнітосферного ядерного вибуху на антенні системи перспективних низькоорбітальних супутників зв'язку та видової розвідки. Таким фактором є інфрачервоне світіння хмари вибуху, оскільки воно найбільш масштабне за часом, простором й енергоємністю. Вирішення поставленого завдання дозволить одержати організаційно-технічні способи підвищення живучості антенних систем бортової апаратури супутників зв'язку та видової розвідки в умовах впливу уражаючих факторів магнітосферного ядерного вибуху.

Постановка проблеми та аналіз літератури

Успіх проведення операції в сучасній війні усе в більшій мірі стає залежним від широкомасштабного застосування космічних засобів. Аналіз результатів ведення сучасних локальних війн виявив ряд недоліків бойового застосування орбітальних угруповань (ОУ) супутників різного призначення. Зокрема, потрібна модернізація існуючих і створення принципово нового космічного сегмента сучасних систем супутникового зв'язку та видової розвідки. Загальною тенденцією їх розвитку є застосування радіоліній крайвисокочастотного (КВЧ) діапазону.

У теперішній час можливе створення на існуючій елементній базі ширококутових супутникових радіоліній КВЧ діапазону з максимальною швидкістю передачі даних в одному стовбурі ретранслятора більше 1 Гбіт/с і відносним часом простою радіолінії за рік порядку 0,1 %.

Виявлення наземних об'єктів радіометрами КВЧ діапазону можна здійснювати з низької колової орбіти шляхом вертикального зондування цілей із площею десятки квадратних метрів і контрастністю десятки кельвінів у ясну погоду на частотах, близьких до 140 ГГц ($\lambda = 2,14$ мм).

Одним із способів підвищення ефективності супутникових систем зв'язку та видової розвідки, що працюють у КВЧ діапазоні, є збільшення коефіцієнта підсилення (КП) бортових антен (збільшення діаметра апертури). Відзначимо, що на частотах, які перевищують 100 ГГц, застосування параболічних антен, що розгортаються, неефективно через низьку точність профілю відбиваючої поверхні рефлектора [1]. Тому в діапазоні КВЧ на борту супутників застосовуються винятково параболічні антени з твердим рефлектором. Максимальний діаметр такого рефлектора обмежений можливостями сучасних ракетоносіїв і може мати розмір порядку 3...4 метри.

Розробка супутникових систем військового і по-

двійного призначення пов'язана з необхідністю забезпечення стійкості космічних апаратів (КА) до впливу можливих засобів ураження. Це досягається шляхом оцінювання рівня надійності їх функціонування в бойових умовах і реалізації пропозицій щодо підвищення стійкості до впливу можливих уражаючих факторів. Існує чотири етапи рішення даної проблеми: аналіз тактико-технічних характеристик і способів застосування різних засобів ураження, визначення найбільш небезпечних з них; оцінювання просторово-часових можливостей впливу різних видів зброї на КА; розрахунок імовірності ураження КА; аналіз результатів досліджень і формування пропозицій щодо забезпечення функціональної стійкості КА.

Огляд можливих засобів ураження КА дозволяє визначити найбільш небезпечні та ймовірні загрози сучасним та перспективним супутникам. Такі загрози виходять від протиракет з ядерними босзарядами систем протикосмічної та протиракетної оборони заатмосферного перехоплення. Актуальність даного аспекту була позначена в доповіді комісії міністра оборони США (2001 рік), що приділила особливу увагу уразливості американської космічної інфраструктури [2].

Розрізняють п'ять основних факторів ураження космічних об'єктів хмарою гарячої надщільної плазми на стадії його розльоту, що утворена магнітосферним ядерним вибухом (МЯВ): теплова і механічна дія рентгенівського і гамма-випромінювання; потік високоенергетичних заряджених часток; електромагнітний імпульс; вторинні електродинамічні ефекти; світіння хмари вибуху і нижньої області підвищеної іонізації [3]. Набір і характеристики факторів, що впливають, залежать від умов вибуху, відстані від нього і властивостей конструкції КА. Імовірність влучення супутника в область ядерного вибуху на ранній стадії його розвитку незначна. Найбільший інтерес викликають уражаючі фактори,

які можуть впливати на КА, що знаходяться на великому віддаленні від центру вибуху і перетинають хмару вибуху на пізній стадії його розвитку.

У Центральному фізико-технічному інституті Міністерства оборони Росії й Оборонному агентстві зі скорочення загрози США в рамках проекту «HALEOS» проводяться дослідження з розробки способів захисту космічного сегмента супутникових систем від уражаючих факторів магнітосферного ядерного вибуху [3 – 5]. У даних роботах інфрачервоне світіння хмари МЯВ не розглядається як уражаючий фактор, хоча це явище найбільш енергоємне і найбільш масштабне за простором і часом.

Мета статті – аналіз факторів, що впливають на стійкість антенних систем космічних апаратів до впливу інфрачервоного світіння хмари МЯВ, для наступної постановки завдання і розробки системної моделі зазначеного впливу.

Основний матеріал

Ефект «засвічення» бортових антен перспективних супутників. Спектральний склад світіння, розміри та профіль збуреної області залежать від координат центру вибуху, його потужності та моменту часу після вибуху. Згідно з [3] максимум спектральної характеристики неполяризованого світіння з часом зміщується з видимого діапазону в інфрачервоний, форма спектральної кривої не збігається з кривою Планка і складається із сукупності спектральних ліній світіння визначених атомів та молекул.

Оскільки на перспективних супутниках зв'язку та розвідки застосовуються великогабаритні прецизійні параболічні антени, то ймовірно найбільш уразливим елементом супутника буде опромінювач, який конструктивно об'єднаний із вхідним каскадом приймального пристрою (ПРМП). При влученні в головну пелюстку діаграми спрямованості бортової антени джерела інтенсивного радіотеплового випромінювання (Сонця або ядерного вибуху) виникає ефект «засвічення», що полягає в зниженні відношення сигнал–шум на вході ПРМП [6]. Основним параметром, що характеризує вплив радіотеплового випромінювання на якість прийому корисного сигналу, є коефіцієнт погіршення енергетики радіолінії K_{Π} , який вимірюється в децибелах [7]:

$$K_{\Pi} = 101g \frac{q_3}{q} = -101g \left[1 + \frac{J(\lambda_p)G\lambda_p^2}{4\pi k T_{н.с} (k_{ш} - 1)} \right],$$

де q_c – відношення сигнал–шум на вході ПРМП при ефекті «засвічення»; q – відношення сигнал–шум на вході ПРМУ без ефекту «засвічення»; $J(\lambda_p)$ – спектральна щільність потужності радіотеплового випромінювання на вхідному каскаді ПРМУ на робочій довжині хвилі λ_p , Вт/м²·Гц; G – коефіцієнт підсилення бортової антени КА; k – постійна Больцмана,

яка дорівнює $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; $T_{н.с}$ – температура навколишнього середовища, К; $k_{ш}$ – коефіцієнт шуму приймача.

Для ПРМП КВЧ діапазону даний коефіцієнт можна представити як [8]

$$K_{\Pi КВЧ} = -101g \left[\frac{T_{опр}}{T_{н.с}} + \frac{J(\lambda_p)G\lambda_p^2}{4\pi k T_{н.с} (k_{ш} - 1)} \right],$$

де $T_{опр}$ – термодинамічна температура опромінювача при ефекті «засвічення», К.

Значення $T_{опр}$ визначається сумою температури навколишнього середовища $T_{н.с}$ і температури нагрівання опромінювача сфокусованим випромінюванням Сонця або хмари ядерного вибуху. Найбільш небезпечний випадок, коли температура $T_{опр}$ стає більше критичної температури, що веде до необоротних процесів в опромінювачі (вхідному каскаді ПРМП). У цьому випадку можна вважати, що КА знаходиться в зоні ураження магнітосферним ядерним вибухом. Критична температура є температурою плавлення (кипіння) матеріалу випромінювача бортової антени.

Математична модель нагрівання опромінювача параболічної антени світінням магнітосферного ядерного вибуху. Ступінь руйнування опромінювача бортової параболічної антени КВЧ діапазону визначається температурою нагрівання опромінювача $T_{опр}$, що залежить від енергетичних, часових, спектральних і оптико-геометричних параметрів світіння хмари МЯВ, геометричних розмірів і спрямованості антени, статистичних параметрів шорсткості відбиваючої поверхні рефлектора і поглинаючої здатності матеріалу опромінювача.

Відсутність строгих аналітичних залежностей, що описують тепловий стан і градієнт температури в опромінювачі, на який впливає змінне в часі випромінювання із суцільним спектром, вимагає розробки математичної моделі нестационарного процесу теплопровідності в тепловій моделі опромінювача і створення моделі джерела тепла. Така модель визначається конструкцією опромінювачів параболічних антен КВЧ діапазону. Неоднорідність матеріалу опромінювача параболічної антени КВЧ діапазону та різноманіття його конструкцій значно ускладнюють строге розв'язання нестационарної задачі теплопровідності. Це приводить до необхідності синтезу універсальної теплової моделі опромінювача на основі ряду допущень.

Замінімо реальний опромінювач (одиначний випромінювач або антенні решітки) його тепловою моделлю у вигляді циліндра, виготовленого з однорідного матеріалу, частково прозорого в інфрачервоному діапазоні частот. Тоді все сфокусоване рефлектором світіння, що не відбивається від поверхні

опромінювача, поглинається матеріалом у скін-шарі, і виконується умова [9]

$$d(\lambda) = \frac{1}{\alpha(\lambda)} \gg \sqrt{a_T \tau},$$

де $d(\lambda)$ – товщина скін-шару матеріалу для випромінювання на довжині хвилі λ , м; $\alpha(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання випромінювання на довжині хвилі λ , 1/м; a_T – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – час впливу випромінювання на матеріал, с.

Оскільки випромінювання поглинається в скін-шарі, то теплофізичні характеристики матеріалу теплової моделі опромінювача визначаються характеристиками матеріалу, що знаходиться в апертурі реального опромінювача. За аналогією з [10] припустимо, що при нагріванні матеріалу його теплофізичні характеристики залишаються постійними, нагрів матеріалу до початку випаровування відбувається без руйнування, витрати енергії на хімічні перетворення і плавлення матеріалу малі.

Джерелом тепла є розподілене по поверхні опромінювача сфальцьоване випромінювання, яке залежить від енергетичних, часових, спектральних і оптико-геометричних параметрів випромінювання, діаметра апертури параболічної антени, статистичних параметрів шорсткості відбиваючої поверхні рефлектора. Можна припустити, що фокальна пляма інфрачервоного випромінювання, сфальцьованого параболічною антеною КВЧ діапазону, значно перевищує розмір прогрітої зони на апертурі опромінювача. Тоді модель джерела тепла приймемо рівномірно розподіленою за апертурою опромінювача випромінювання зі спектральною щільністю потужності

$$J_{д.т}(\lambda, t) = \int_{S_{опр}} J_{сф}(\lambda, t, \vec{r}_{опр}) dS,$$

де $J_{д.т}(\lambda, t)$ – спектральна щільність потужності джерела тепла в момент часу t , Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{Гц}$); $J_{сф}(\lambda, t, \vec{r}_{опр})$ – розподіл спектральної щільності потужності сфокусованого випромінювання по поверхні опромінювача, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{Гц}$); $S_{опр}$ – геометрична площа апертури опромінювача, м^2 ; $\vec{r}_{опр}$ – радіус-вектор, який характеризує координату довільної точки на апертурі опромінювача.

Аналіз прийнятої теплової моделі опромінювача і моделі джерела тепла показує, що при впливі на опромінювач інфрачервоного випромінювання роль теплопровідності несуттєва, і процес поширення випромінювання в матеріалі можна не розглядати [10]. Розподіл температури в матеріалі $T_{опр}$ визначається безпосереднім проникненням світіння МЯВ в опромінювач та описується рівнянням

$$T_{опр} = T_{н.с} + \int_{t_1}^{t_2} \int_{\lambda_1(t)}^{\lambda_2(t)} \frac{J_{д.т}(\lambda, t) A(\lambda) \alpha(\lambda)}{\rho c} e^{-\alpha(\lambda)z} d\lambda dt,$$

де $A(\lambda)$ – поглинаюча здатність матеріалу на довжині хвилі λ ; ρ – масова щільність матеріалу опромінювача, $\text{кг}/\text{м}^3$; c – теплоємність матеріалу опромінювача, Дж/(кг·К); z – координата, спрямована від поверхні всередину опромінювача; $t_{1(2)}$ – момент часу початку (завершення) впливу світіння на опромінювач (час початку розвитку вибуху $t = 0$), с; $\lambda_{1(2)}(t)$ – мінімальна (максимальна) довжина хвилі світіння в момент часу t , м.

При нагріванні опромінювача в момент часу t_b температура на поверхні ($z = 0$) досягає значення температури кипіння T_k , К, і надалі матеріал починає випаровуватися. Всередину опромінювача поширюється хвиля випаровування зі швидкістю V_b , яку можна знайти з рівняння теплового балансу [10]

$$V_b(t) = \frac{\int_{\lambda_1(t)}^{\lambda_2(t)} J_{д.т}(\lambda, t) A(\lambda) d\lambda}{\rho [c(T_k - T_{н.с}) + Q_b]},$$

де Q_b – питома теплота випару, Дж/кг. Швидкість поширення хвилі випаровування змінюється з часом, що обумовлено зміною спектрального складу люмінесцентного світіння на пізній стадії розвитку МЯВ.

Інтенсивне випромінювання згодом призводить до форсованого випаровування матеріалу. При цьому джерело теплоти в матеріалі є об'ємним і на поверхні випаровування діє тепловий стік, обумовлений фазовими переходами. Температуру на поверхні опромінювача, виготовленого з матеріалу з поглинаючою здатністю $A(\lambda) = 1$, при впливі нестационарного випромінювання із суцільним спектром у часовому інтервалі (t_1, t_2) можна представити як

$$T_{опр} = T_{н.с} + \int_{t_1}^{t_2} \int_{\lambda_1(t)}^{\lambda_2(t)} [A1(\lambda, t, z) + A2(\lambda, t, z)] d\lambda dt,$$

де $A1(\lambda, t, z) = \frac{J_{д.т}(\lambda, t) (\beta(t) - \alpha(\lambda))}{\rho c} e^{-\alpha(\lambda)z}$;

$$A2(\lambda, t, z) = \left(T_k - T_{н.с} - \frac{J_{д.т}(\lambda, t) \beta(t)}{\rho c} \right) e^{-\beta(t)z};$$

$$\beta(t) = \frac{V_b(t)}{a_T}.$$

При спільній дії об'ємного джерела теплоти в матеріалі та поверхневого стоку на деякій глибині досягається максимальна температура внаслідок поглинання енергії всередині матеріалу попереду фронту хвилі випаровування.

Термодинамічна температура опромінювача істотно залежить від фокусуєчих властивостей параболічного рефлектора. Для формування цільної моделі впливу люмінесцентного світіння МЯВ на опромінювач параболічної антени КВЧ діапазону запишемо вираз

$$J_{сф}(\lambda, t, \vec{r}_{опр}) = F(\lambda, \vec{r}_{опр}) J_{с.с}(\lambda, t, \vec{r}),$$

де $F(\lambda, \vec{r}_{\text{опр}})$ – розподіл сфальцьованого електромагнітного поля на апертурі опромінювача, що залежить від довжини хвилі; $J_{\text{с.с}}(\lambda, t, \vec{r})$ – спектральний склад світіння МЯВ у момент часу t на віддаленні від центра вибуху \vec{r} .

Для визначення функції $F(\lambda, \vec{r}_{\text{опр}})$ необхідно розв'язати задачу дифракції падаючої хвилі на параболічному рефлекторі КВЧ діапазону з урахуванням шорсткості відбиваючої поверхні. Найбільш ефективним методом розв'язання даної задачі є метод інтегральних рівнянь для поверхневої щільності струму.

Спектр світіння МЯВ визначається сукупністю світіння молекул і атомів при дезактивації їх збуджених станів. Розрахунок спектра можна зробити, використовуючи положення теорії спектроскопії і дані досліджень полярних сяїв.

Висновки

Вказана перспективність застосування КВЧ радіоліній на низькоорбітальних супутниках. Реальною загрозою таких супутників є магнітосферний ядерний вибух. Основним фактором ураження супутників, віддалених від центру вибуху, є інфрачервоне світіння, що фокусується параболічною антеною. Це може привести до фізичного пошкодження опромінювача. Наведено математичну модель процесу нагрівання опромінювача сфокусованим нестационарним випромінюванням із суцільним спектром, а також постановку часткових задач, спрямованих на розв'язання загальної задачі на основі представленої системної моделі.

Захистити опромінювач великогабаритної прецизійної антени космічного базування від впливу інфрачервоного світіння хмари магнітосферного ядерного вибуху можна шляхом нанесення на відбиваючу поверхню рефлектора шорсткості, закриття апертури опромінювача термостійким матеріалом, відхилення антени, зміни орбіти супутника.

Найбільш ефективним і дешевим способом захисту супутника є нанесення на відбиваючі поверхні параболічного рефлектора шорсткості, що призведе до розсіювання інфрачервоного випромінювання і фокусування радіохвиль КВЧ діапазону. Визначити параметри такої шорсткості можна за допомогою розширеного електродинамічного критерію гладкості [11 – 14].

Запропоновану математичну модель можна використовувати для оцінки ступеня ураження космічних апаратів при ядерному вибуху в космосі, при розробці технології виготовлення великогабаритних прецизійних параболічних антен; для визначення вимог до швидкодії систем виявлення ядерних вибухів і керування орбітальним угрупованням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ломан В.И., Гряник М.В., Бондарь Л.В. Состояние техники высокоэффективных зеркальных антен // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 5. – С. 78 – 90.
2. Дорофеев В. Взгляды американского военного руководства на формы боевого применения космических сил // Зарубежное военное обозрение. – 2001. – № 8. – С. 25 – 32.
3. Физика ядерного взрыва: В 2 т. / Под ред. В.М. Лоборева. – М.: МО РФ ЦФТИ, 2000. – Т. 1: Развитие взрыва. – 527 с.
4. Parmentola J. High Altitude Nuclear Detonations (HAND) Against Low Earth Orbit Satellites ('HALEOS') (Slides) // Advanced Systems and Concepts Office. – DTRA (USA), 2001. – 32 p.
5. Papadopolous D. Satellite Threat Due to High Altitude Nuclear Detonations // Center for Nonproliferation Studies. – Monterey (USA), 2002. – 33 p.
6. Воробьев Р.В. Эффект «засветки» Солнцем земных станций перспективных систем спутниковой связи военного назначения // Аэрокосмическая техника и технологии. – Х.: ХАИ, 2001. – № 22. – С. 39 – 44.
7. Петрович Н.Т., Камнев Е.Ф., Каблукова М.В. Космическая радиосвязь. – М.: Сов. радио, 1979. – 279 с.
8. Воробйов Р.В., Первачук А.В. Фокусировка радиотеплового излучения прецизионными параболическими рефлекторами // Труды VI международного форума «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке». – Х.: ХНУРЭ, 2002. – С. 116 – 117.
9. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. – М.: Мир, 1986. – 502 с.
10. Приходько И.М., Дурев В.А., Винник А.Л. О воздействии непрерывного лазерного излучения высокой интенсивности на композиционное теплозащитное покрытие с объемным поглощением излучения // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2001. – № 3. – С. 59 – 63.
11. Ермаков Г.В., Воробйов Р.В. Расширенный электродинамический критерий гладкости // Системы обработки информации: 36. наук. пр. – Х.: ХУ ПС, 2005. – Вып. 1(41). – С. 173 – 179.
12. Воробйов Р.В., Бутакова С.В. Электродинамический критерий гладкости поверхности с шероховатостью в виде гауссовых канавок для Е волн // Труды 12 международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 9 – 13 сентября 2002. – С. 317 – 318.
13. Vorobjov R.V., Butakova S.V. Electrodynamical criterion of smoothness as expanded Rayleigh's criterion // Proc. of the 27th URSI General Assembly. – Maastricht, the Netherlands, 17 – 24 August 2002. – CD-ROM ursiga02 (401125376 bytes) Commission F3, p0116.pdf. – 4 p.
14. Бутакова С.В., Воробйов Р.В. Электродинамический критерий гладкости // Радиотехника. – Х., 2002. – № 124. – С. 61 – 67.

Надійшла 13.01.2006

Рецензент: д-р техн. наук професор П.Ю. Костенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.