

ОСОБЛИВОСТІ ЗАХИСТУ ВІД ДЕСТРУКТИВНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРИЙМАЛЬНІ ВУЗЛИ ЗАСОБІВ СУПУТНИКОВОГО ІНТЕРНЕТУ

А. В. Сірмановський¹, О. Д. Василенко¹

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

Анотація

Стаття присвячена проблемі захисту приймальних вузлів систем супутникового інтернету від деструктивного впливу електромагнітного випромінювання.

Розглядаються основні методи деструктивного впливу на антени та технології і методи, що можуть бути використані для захисту приймачів від деструктивного впливу — зокрема захисні екрани.

Ключові слова: функціональне ураження, сигнал, метод модуляції, електромагнітне випромінювання.

Вступ

Супутниковий інтернет є однією з ключових технологій забезпечення доступу до нього в областях, де проведення провідникового зв'язку є неможливим або дуже складним.

Особливу популярність супутниковий інтернет отримав в умовах відключень електроенергії, а також у сфері управління військовими операціями. Проте, приймальні вузли (антени) супутникового інтернету можуть бути піддані деструктивному впливу електромагнітного випромінювання (ДЕМВ), яке може призвести до втрати можливості подальшої роботи до усунення поломки. Тому забезпечення максимальної захищеності приймачів від ДЕМВ є необхідною задачею.

1. Системи супутникового інтернету

Супутниковий інтернет — спосіб забезпечення доступу до мережі Інтернет з використанням технологій супутникового зв'язку.

Супутниковий зв'язок — один з видів космічного радіозв'язку, що базується на використанні штучних супутників Землі, на яких змонтовані ретранслятори. Супутниковий зв'язок здійснюється між земними станціями, які можуть бути як стаціонарними, так і мобільними.

Користувач надсилає запит до інтернет ресурсу, який модулюється терміналом та транслюється супутнику. Супутник в свою чергу демодулює сигнал, та модулює його знову. Цей процес створений для того, щоб уникнути великих похибок в сигналі так як він проходить значну відстань. Після цього супутник транслює сигнал до наземної станції провайдера, який відправляє запити до «мережі інтернет». На шляху до терміналу сигнал проходить такі самі зміни: модуляція в передавачі наземної станції

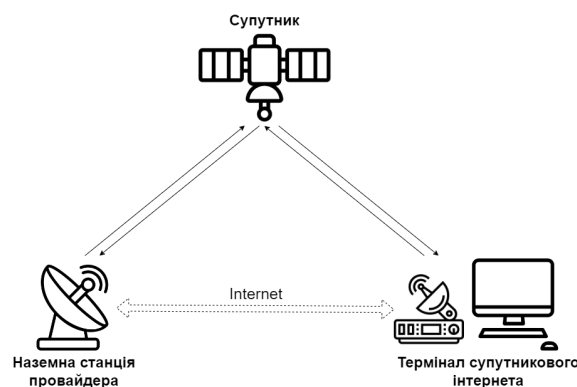


Рис. 1. Схема взаємодії елементів супутникового інтернету

провайдера, демодуляція та модуляція у супутнику, демодуляція сигналу у приймачі терміналу, та перенесення частот сигналу на низькі, для більшої зручності його обробки [1].

Більшість сучасних систем супутникового інтернету використовують Кудіапазон передавання/приймання сигналу (11 – 14 ГГц).

З Рис. 1 зрозуміло, що ДЕМВ може бути спрямований, головним чином на наземні станції прийому, тому що захистити кожного користувача практично неможливо.

2. Методи деструктивного впливу на приймальні вузли засобів супутникового інтернету

ДЕМВ є одним із методів радіо-електронного придушення. Деструктивний вплив призводить до фізичного нанесення шкоди технічним засобам чи їх

елементам внаслідок впливу електромагнітного поля.

Принцип деструктивного впливу на засоби зв'язку

Принципом деструктивного впливу може бути підвищення напруги у колах приймача, яка призводить до електричного пробоя діелектриків чи напівпровідників у схемі [2, 3]. Пробій — явище втрати діелектриком електроізоляційних властивостей з утворенням каналу електропровідності при розміщенні його в електричному полі.

Кожний діелектрик може бути використаний тільки при напруженостях електричного поля, що не перевищують певного граничного значення. Якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення, відбудеться пробій діелектрика або порушення його електричної міцності. При цьому наскрізний струм, що проходить через діелектрик, різко зростає, а опір діелектрика падає, що приводить до втрати його електроізоляційних властивостей. Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою, а відповідне значення напруженості поля — електричною міцністю діелектрика.

Методи деструктивного впливу на засоби зв'язку

Основним методом ДЕМВ на приймальні антени є генерація надзвичайно потужного сигналу, який призведе до виводу з ладу елементів в колах приймача.

Враховуючи малі геометричні розміри елементів компонентної бази (не більше 2 – 3 мм), а також те, що діапазон руйнуючих напруг, $U_{пр}$, наприклад на входах мікротранзисторів та сучасних мікросхем складає 10 – 30 В можливо оцінити, яка потрібна напруженість поля на вході елемента [4].

$$U_{пр} = \int E dl$$

Звідки, при постійному впливі можна визначити, що $E = U_{пр}/dl$. При $dl = 3 \cdot 10^{-3}$ та $U_{пр} = 30$ В отримаємо значення $E = 10^4$ В/м, або не менше 10 В/см.

Вимоги до форми сигналу

Сучасні приймачі захищені від звичайних побічних завад та шумів. Тому для успішного проникнення ДЕМВ у кола приймача потрібно щоб він був максимально подібний до корисного сигналу, який обробляє система.

Так одні із найбільш популярних на даний момент терміналів супутникового інтернету оперують сигналом на частотах 13.0 – 13.25 ГГц на передавання і 14.0 – 14.5 ГГц на приймання з методом модуляції 64QAM [5]. QAM - (Quadrature Amplitude Modulation - Модуляція методом квадратичної амплітуди [6]) - це технологія передачі цифрового інформаційного

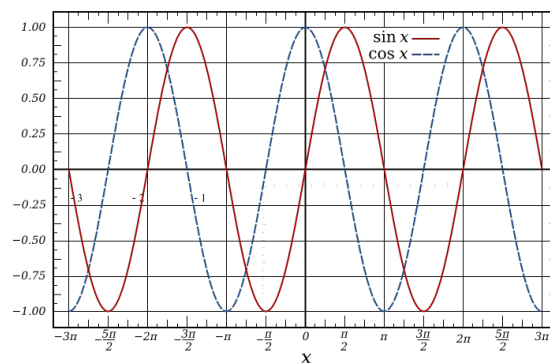


Рис. 2. QAM-сигнал

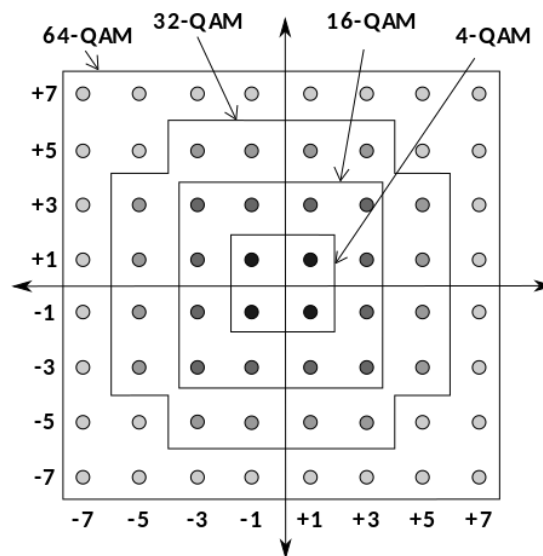


Рис. 3. Кодування сигналу за допомогою QAM різної розрядності

потoku у вигляді аналогового сигналу. Вона досягається шляхом поділу несучої хвилі на дві несучі однакової частоти, зміщені відносно одна-одної на 90° , кожна з яких промодульована по одному з двох або більше дискретних рівнів амплітуди (Рис 2).

Комбінація всіх рівнів амплітуди на цих двох несучих являє собою бінарну бітову картину (Рис. 3).

Тобто для успішного ДЕМВ методу 3 на ці системи потрібно генерувати послідовні імпульси високої потужності на частоті прийому 14.0 – 14.5 ГГц з фазовим зсувом у 90° .

3. Методи захисту від направленої електромагнітного випромінювання

Існує кілька методів та технологій, що можуть бути використані для захисту терміналів супутникового інтернету від деструктивного впливу.

Переривання сигналу

Для переривання сигналу надвеликої потужності який приймається антеною може бути використаний пристрій захисту від імпульсних перенапруг (ПЗП) при з'єднанні антени з вхідним колом приймача.

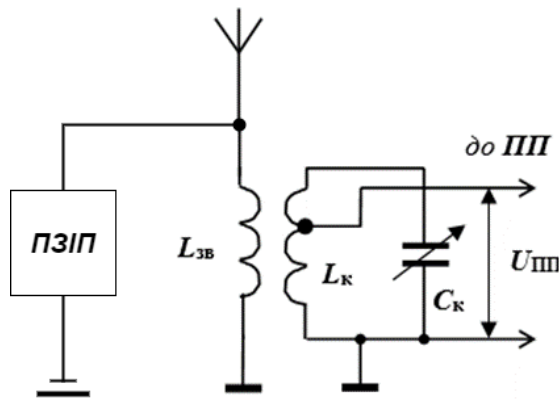


Рис. 4. Використання ПЗП при підключенні антени до вхідного кола

Основним чутливим елементом ПЗП є особливий напівпровідниковий модуль (варистор), опір якого різко зменшується, якщо напруга, яка протікає через нього, перевищує номінальні встановлені значення. Коли, з якої-небудь причини, напруга в мережі різко зростає, опір напівпровідникового елемента ПЗП миттєво падає до мінімальних значень. В результаті цього струм починає надходити через захисний пристрій на контур заземлення. Після того, як напруга знизиться до допустимих меж, опір варистора зростає і ланцюг продовжить роботу в звичайному режимі.

Приклад схеми індуктивного зв'язку антени із вхідним колом приймача з використанням ПЗП наведено на Рис. 4.

Екранування антени

Ще одним методом захисту терміналів супутникового зв'язку від електромагнітних імпульсів високої потужності може слугувати екранування.

Навколо антени встановлюються захисні екрани. Ці екрани забезпечують захист антени від побічного електромагнітного випромінювання, що може заважати нормальному функціонуванню антени. Екрани можуть бути виготовлені з різних матеріалів, включаючи метал, карбон та інші композитні матеріали, які мають високу електропровідність та можуть поглинати електромагнітне випромінювання.

При встановленні захисного екрану необхідно звернути увагу, на діаграму направленості антени приймального пристрою. При організації встановлення захисного екрану потрібно звернути увагу на те, що він не повинен заважати корисному сигналу, але при цьому максимально захистити антену від зовнішніх ДЕМВ що надходять не по головному пелюстку антени прийому. Окрім прийому по основному напрямку, антена також приймає сигнал через бокові пелюстки, тому потрібно враховувати це при проектуванні захисного екрана [7].

Для аналізу діаграми спрямованості потрібно знати характеристики антени. Приведемо приклад характеристик антени, яка використовується в системах супутникового інтернету (Табл. 1).

Таблиця 1. Характеристики антени

Назва характеристики	Значення
Діапазон частот	13 – 14 ГГц
Тип антени	Параболічна
Призначення антени	Прийомопередаюча
Діаметр антени	1.6 м
Ширина діаграми направленості на рівні -3 дБ	1.1°
Коефіцієнт підсилення антени	46 дБ
Потужність випромінювання	242.7 кВт

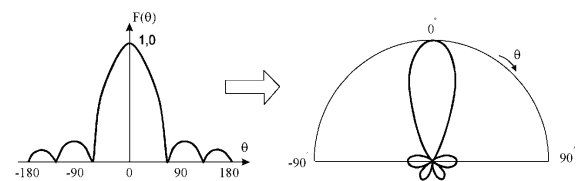


Рис. 5. Діаграма направленості антени

Приблизна діаграма направленості для антени з даними характеристиками (Рис. 5).

З рисунку видно, що коефіцієнт підсилення у бокових пелюстах і задніх пелюстках становить приблизно 0.2 від основного пелюстка. Коефіцієнт підсилення бічних пелюстків складає $0.2 * 46 \text{ дБ} = 9 \text{ дБ}$. Підсилення такого значення також впливає на прийомний сигнал. Таким чином межі екрану повинні закривати основний і бокові пелюстки діаграми спрямованості.

Так як антена направлена вгору, для прийому супутникового сигналу, то ширина екрану повинна дорівнювати ширині бокових пелюстків антени. При перерізі діаграми направленості горизонтальною площиною отримаємо вигляд бічних пелюстків антени згори (Рис. 6).

Як видно з малюнку зона для екранування становить прямокутник із довжиною сторони (X) 400 м та шириною (Y) 200 м.

Така ширина екрану занадто велика, тому обрахуємо кут розкриття діаграми спрямованості для екрану шириною 100 м. Тоді кут розкриття діаграми спрямованості рівний:

$$\theta = 2 * \arctan\left(\frac{0.1}{2 * X}\right) = 2 * \arctan\left(\frac{0.1}{2 * 0.4}\right) = 0.25^\circ$$

Тепер знайдемо такий діаметр антени, що має такий кут розкриття:

$$D = 60 * \frac{\lambda}{\theta} = 60 * \frac{0.02}{0.25} = 4.8 \text{ м}$$

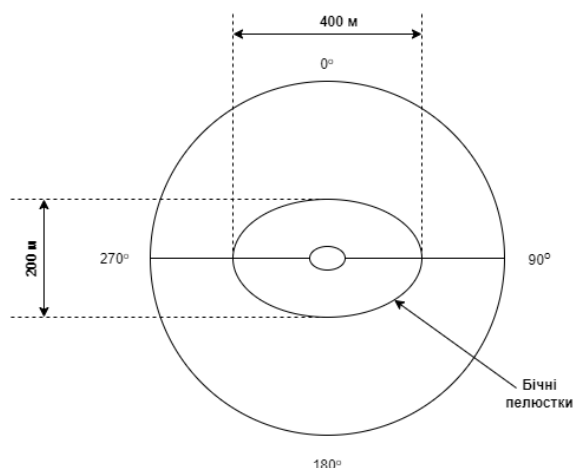


Рис. 6. Бічні пелюстки діаграми направленості антени згори

Отже, для того, щоб зменшити зону екранування потрібно встановити антену з визначеним діаметром.

Варто зауважити, що усі описані вище методи, необхідно запроваджувати разом із введенням контрольованої зони навколо терміналу. Межі контрольованої зони повинні відповідати попереднім розрахункам зони екранування.

Висновок

У цій статті ми розглянули основні аспекти при плануванні захисту від функціонального ураження ДЕМВ на приймальні вузли засобів супутникового інтернету різними методами. Розглянуті найбільш можливі методи захисту антен від ДЕМВ. Зрозуміло, що ніякий із описаних вище методів захисту не гарантує 100 % захищеності системи, тому найкращим варіантом буде впровадження комплексної системи

захисту, яка включає усі описані у цій статті методи.

Перелік використаних джерел

1. Ніколаєнко Б., Пелешок Є. Сучасні супутникові системи зв'язку. — ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 146 с.
2. Чорногор Л. Ф. Функціональне ураження радіоелектронних систем // Прикладні аспекти радіоастрономії, радіофізики та електроніки. — 2021. — С. 358—369. — DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra>. — URL: <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/1373>.
3. Burrell J. Disruptive Effects of Electromagnetic Interference on Communication and Electronic Systems. — 2003. — URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1%5C&type=pdf%5C&doi=5c429bf0b7ec04c0df8b28b73c6c55e7c52e363a>.
4. Попов О. О., Василенко О. Д. Протидія роботі безпілотних літальних апаратів за допомогою високоенергетичних електромагнітних імпульсів // Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. — 2013.
5. Signal Structure of the Starlink Ku-Band Downlink / T. E. Humphreys, P. A. Iannucci, Z. M. Komodromos, A. M. Graff. — URL: https://radionavlab.ae.utexas.edu/wp-content/uploads/2023/01/starlink_structure.pdf.
6. Quadrature amplitude modulation. — 12/02/2001. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation.
7. Савченко Я. В., Василенко О. Д. Прихованість інформації при передачі за допомогою РРС // Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. — 2013. — С. 180—181.