УДК 623.61:355.40

С.В. Закіров

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ДАЛЬНОСТІ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ УМОВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Запропоновано метод розрахунку дальності взаємного впливу радіоелектронних засобів який враховує умови розповсюдження радіохвиль. Метод, який пропонується, дозволяє вести розрахунки дальності взаємного впливу РЕЗ не тільки в області прямої видимості, але й в області напівтіні та тіні. Запропонована модель рефракційної атмосфери, яка дозволяє розраховувати градієнт коефіцієнта переломлення атмосфери.

Ключові слова: *електромагнітна сумісність, умови розповсюдження радіохвиль.*

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Як відомо, проблема забезпечення спільної роботи різних радіоелектронних засобів (РЕЗ) набуває все більшої актуальності. Це пов'язано з експоненціальним зростанням кількості, різноманіттям і складністю РЕЗ, тенденцією збільшення кількості і номенклатури РЕЗ, якими оснащаються збройні сили з однією сторони, та обмеженими можливостями використання діапазонів радіочастот з іншої. У зв'язку з цим виникає задача оцінки дальності взаємного впливу РЕЗ. На дальність впливають різні фактори: енергетичні – випромінювана потужність, коефіцієнт підсилення передавальної антени, еквівалентна чутливість РЕЗ і ін.; умови поширення радіохвиль – довжина хвилі, час року, характер траси поширення, взаємне розташування РЕЗ, земля, атмосфера.

Перша група факторів залежить в основному від технічних характеристик РЕЗ, які повинні узгоджуватись на етапі проектування між фахівцями, що безпосередньо відповідають за нормальне функціонування РЕЗ, конструкторами, розробниками, співробітниками служб експлуатації і управління.

Другий фактор оказує вплив на РЕЗ безпосередньо в умовах експлуатації. Так вплив землі виявляється в наявності в місці прийому прямої хвилі і відбитої від поверхні землі, що приводить до виникнення інтерференції. В результаті в одних точках простору поле буде збільшуватися, в інших зменшуватися, що приведе до різної величини дальності взаємного впливу РЕЗ. Сферичність рельєфу земної поверхні також впливають на поширення радіохвиль. Питання пов’язані з урахуванням умов поширення радіохвиль при розрахунках електромагнітної сукупності РЕЗ в даний час вивчені не повно. Це, в першу чергу пов’язано з тим, що атмосфера є одним з найдинамічніших компонентів навколишнього природного середовища. Стан атмосфери Землі визначається безліччю фізичних характеристик і процесів, хімічним складом і перетвореннями речовин, синоптичними і кліматологічними характеристиками, процесами взаємодії із зовнішніми чинниками і антропогенною дією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує ряд різних методик розрахунку ЕМС, що дозволяють одержати кінцевий результат з тим або іншим ступенем вірогідності. Вони засновані на натурному і напівнатурному експериментах, аналітичних, графічних і графоаналітичних методах і методах математичного моделювання [1]. Можливості перших обмежуються значними матеріальними витратами, а в ряді випадків практично нездійсненні. Однак низька точність даних методів і неможливість оцінити при їх використанні ефективність численних варіантів розміщення РЕЗ обмежують область їх застосування. Найкращі можливості в рішенні задач оцінки дальності взаємного впливу РЕЗ мають методи математичного моделювання, що базуються на математичних (аналітичних) або імітаційних моделях.

Метою статті є розробка математичної моделі оцінки дальності взаємного впливу РЕЗ з урахуванням умов розповсюдження радіохвиль.

Основна частина

У залежності від взаємного розташування РЕЗ виділяють наступні області: прямої видимості, півтіні і тіні. Оцінка взаємного впливу РЕЗ ґрунтується на використанні закономірностей поширення у вільному просторі, інтерференції, дифракції і далекого тропосферного розповсюдження радіохвиль. Область прямої видимості простирається до радіогоризонту, дальність якого з урахуванням атмосферної рефракції радіохвиль визначається вираженням:

$$R_{пв} = \sqrt{2kR_0}\,(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}), \quad [км] \qquad (1)$$

де $R_{пв}$ – дальність прямої видимості, км; h_1 – висота підйому антени щодо загального рівня відліку - поверхні землі, м; h_2 – висота підйому антени 2-ої РЕЗ, м; $R_0 = 6370$ км – радіус Землі; $k = \left(1 + R_0\, dn/dh\right)^{-1}$ – коефіцієнт, що враховує рефракцію радіохвиль; dn/dh – градієнт коефіцієнта переломлення атмосфери.

Для обчислення значення dn/dh пропонується використати модель модифікованого еквівалентного радіуса Землі. У ній передбачається, що в межах висот до 1 км, індекс рефракції n лінійно зменшу-

© С.В. Закіров

ється з висотою в інтервалі висот від h_s - висоти земної поверхні над рівнем моря до h_s+1. Таким чином, для інтервалу висот $h_s \le h \le h_s+1$:

$$n(h) = (n_S - (h - h_S)7.32e^{0.005577 n_S})10^{-6}, \quad (2)$$

де n_s- індекс рефракції на висоті h_s.

Далі покладається, що, починаючи з висоти h_s+1 км величина n зменшується по експонентному закону до постійного значення. Таким чином, для інтервалу висот $h_s+1 \le h \le 9$ км:

$$n(h) = -\left(n_1 Ceõð\left(-1 \Big/ \left(8 - h_s\right) \cdot \ln \frac{n_1}{105} (h - h_S - 1) \right) \right) \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

де n_1 – індекс рефракції на висоті 1 км.

На висотах більш 9 км, внесок яких у загальне скривлення траєкторії радіохвиль виявляється менш 10% [2], можна використати єдину експоненціальну залежність n від висоти для всіх кліматичних районів і сезонів року. Можна вважати, що при $h \ge 9$ км:

$$n(h) = 105e^{-0.1424(h-9)}10^{-6}, \quad (4)$$

де коефіцієнт експоненціальності визначений шляхом обробки даних методом найменших квадратів [2].

Розрахунок дальності взаємного впливу в межах $R < R_{пв}$ роблять по формулах поширення радіохвиль у вільному просторі по відбивальним формулах [3]. Використання формул для вільного простору правомірно, коли поверхня землі не бере участь у формуванні діаграми спрямованості антени РЕЗ. Це справедливо при використанні гостроспрямованих антен, орієнтація яких по куту місця виключає відображення від землі. Дальність радіозв'язку у вільному просторі без урахування загасання радіохвиль в атмосфері визначається як:

$$R_0 = \left(\lambda / 4 \cdot \pi\right) \cdot \sqrt{P_{äæ} G_{äæ} G_{ï ð} \gamma_{ï î ë} \eta / P_{ï î ð}}, \quad (5)$$

де $P_{дж}$ – потужність джерела випромінювання; $G_{дж}$ – коефіцієнт підсилення антени джерела випромінювання; $G_{пр}$ – коефіцієнт підсилення антени приймача; $\gamma_{пол}$ – коефіцієнт, що враховує розбіжність полярізацій антен джерела випромінювання і приймача; η – коефіцієнт передачі потужності сигналу від антени на вхід приймача; $P_{пор}$ – гранична чутливість приймача.

З урахуванням загасання радіохвиль в атмосфері розрахункова формула приймає вид:

$$R = R_0 10^{-\alpha \cdot R/20}, \quad (6)$$

де α – коефіцієнт загасання радіохвиль на кілометр шляху в тропосфері, дБ/км.

У ряді випадків, особливо в метровому діапазоні, до РЕЗ можуть приходити пряма і відбита від поверхні землі радіохвилі. Їх взаємодія враховується в розрахунках спеціальним інтерференційним множником f(ε). Останнє має місце у випадку слабоспрямованого випромінювання джерела, чи спрямованого, але під малими кутами місця. Розрахунок дальності взаємного впливу РЕЗ здійснюється по відбивальним формулах, одержуваним заміною в (5) коефіцієнта $G_{дж}$ на множення $G_{дж} f(\varepsilon)$.

Результати розрахунку по формулах вільного простору з використанням відбивальних формул вважаються достовірними, якщо отримане значення $R \le 0,8R_{пв}$. Якщо ж $R \ge 0,8R_{пв}$, то це означає, що при заданому енергетичному потенціалі джерела, його сигнал має граничне значення для РЕЗ десь в області півтіні або тіні і на наступному етапі розрахунок потрібно робити по дифракційних формулах. У цьому випадку для розрахунку $E_{m\,розр}(R)$ використовуються формули В.А.Фока [4]. Ці ж формули можуть використовуватися й у тому випадку, якщо потужність джерела випромінювання, коефіцієнт підсилення антени і висота її підйому відрізняються від розрахункових і будуть, зокрема, рівні $P_{дж}, G_{дж}, h_{дж}$. У цьому випадку замість амплітуди напруженості поля $E_{м\,розр}$ вийде амплітуда напруженості

$$Å_ì\ (R) = \left(Å_ì\ ðî çð(R) f(h_{äæ}) / f(h_{ðî çð}) \right) \sqrt{Ð_{äæ} G_{äæ}}. \quad (7)$$

Тут $f(h_{розр})$ і $f(h_{дж})$ – висотні коефіцієнти, відношення яких враховує зміну напруженості поля в точці прийому за рахунок відмінності висоти антени джерела випромінювання $h_{дж}$ від висоти $h_{розр}$. Характер зміни цих коефіцієнтів приведений на рис. 1.

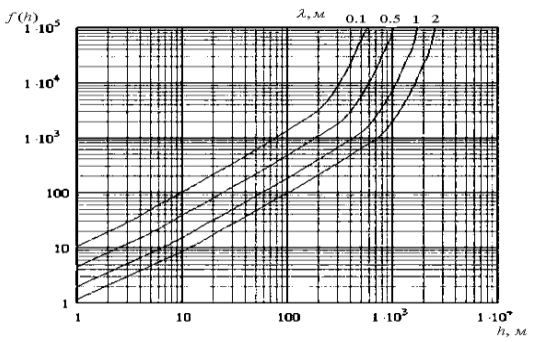

Рис. 1. Номограма для визначення висотних коефіцієнтів

При розрахунку дальності взаємного впливу РЕЗ виходять з еквівалентної чутливості $S_{пор}$, знаючи яку можна визначити граничну чутливість по полю: $E_{m\,пор} = \sqrt{240\pi S_{пор}}$. Оскільки обумовлена з (7) величина $E_м(R)$ на граничній дальності саме дорівнює $E_{m\,пор}$, то використовуючи (7), можна знайти $E_{м\,розр}$. Знаючи $E_{м\,розр}$, за формулами В.А.Фока [4] визначається дальність взаємного впливу, після чого перевіряється виконання умови $0,8R_{пв} < R_p < (1,5...2)R_{пв}$.

Експериментально встановлено, що в області глибокої тіні напруженість поля сигналу (щільність потоку потужності) істотно перевищує величину, обумовлену дифракцією радіохвиль. Причиною цього є тропосферне розсіювання в діапазоні хвиль $\lambda < 10$ м і іоносферне – у діапазоні $\lambda \ge 5..15$ м, що викликає їх далеке тропосферне (іоносферне) поширення.

За сучасними поглядами, заснованими на експериментальних даних, виділяють, принаймні, три

фактори, що сприяють ДТР: некогерентне розсіювання (перевипромінювання) електромагнітних хвиль на об'ємних чи тропосфери навіть стратосфери. У цих неоднорідностях міняється обсяг, температура, вологість, що в кінцевому рахунку приводить до зміни діелектричної проникності $\varepsilon = n^2$ (n – показник переломлення). Розсіяне поле являє собою випадковий процес у виді суми полів великого числа приблизно однакових джерел (перевипромінювачів) з амплітудою розподіленою за законом Релея і рівномірно розподіленою фазою; некогерентне розсіювання від шаруватих, протяжних неоднорідностей. У порівнянні з першим випадком інтенсивність полючи буде вище, закон розподілу амплітуд ближче до узагальненого закону Релея (з'являється одна чи кілька домінуючих крапок). Прикладом таких неоднорідностей є пір'ясті хмари; відображення електромагнітних хвиль від плавних неоднорідностей, обумовлених зміною градієнта показника переломлення по висоті. Відображення когерентні, причому когерентність тим вище, чим більше значення градієнта dn/dh. На графіку (рис. 2) представлені експериментальні дані по інтенсивності поля дифракції й тропосферного розсіювання у функції відстані від джерела випромінювання.

Рівняння регресії має вигляд

$$B = B_0 - k\lg(R), \qquad (8)$$

де $B = 20\lg E_m(R)/E_{m0}(R) = 10\lg S(R)/S_0(R)$ – ослаблення поля (щільності потоку потужності) тропосферного розсіювання в порівнянні з вільним простором. Підставляючи в (6) значення $B = -40$ дБ при $R = 100$ км й $B = -100$ дБ при $R = 1000$ км, одержимо значення коефіцієнтів регресії $B_0 = 80$, $K = 60$.

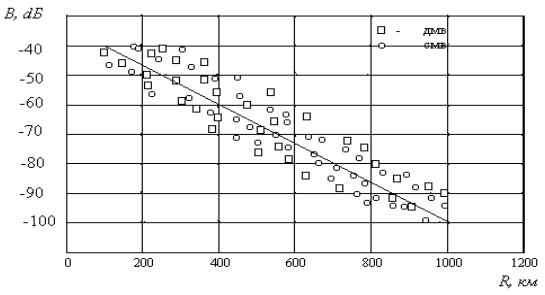

Рис. 2. Експериментальні дані по інтенсивності поля дифракції й тропосферного розсіювання

Тоді (6) після перетворень має вигляд

$$S(R) = R^{-1}S_0(R)10^8.$$

Дорівнюючи S(R) й $S_{пор}$, з урахуванням $S_0 = P_{дж}G_{дж}(4\pi R^2)^{-1}$ одержимо

$$R_0[км] = 10^8\sqrt{\frac{P_{дж}G_{дж}A_{пр}\gamma_{пр}\eta_{пр}}{4\pi 10^6 P_{пор}}}к(\lambda), \qquad (9)$$

де k(λ) – поправочний множник, значення якого визначається згідно (рис. 3).

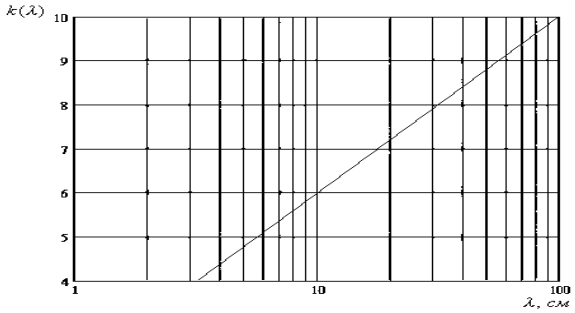

Рис. 3. Графік для визначення k(λ)

Висновок

Таким чином, приведений метод дозволяє визначити дальність взаємного впливу РЕЗ з урахуванням умов розповсюдження радіохвиль не тільки в області прямої видимості, але й в області напівтіні та тіні, та може бути використаний при відповідних розрахунках в автоматизованому режимі. У подальшому за умови впровадження автоматизованих систем управління, цей метод може стати основою програмного забезпечення автоматизованого робочого місця.

Список літератури

1. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Под ред. Н.М. Царькова. – М.: Радио и связь, – 1985. – 272 с.

2. Атмосфера.: Справочник / Под ред. Ю.С. Седунова. – Ленинград.: Гидрометеоиздат, 1991. – 510 с.

3. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.

4. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М.: Сов. радио, 1970. – 517 с.

Надійшла в редколегію 5.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Зима, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТОД РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

С.В. Закиров

Предложен метод расчета дальности взаимного влияния радиоэлектронных средств который учитывает условия распространения радиоволн. Предлагаемый метод позволяет вести расчеты дальности взаимного влияния РЭС не только в области прямой видимости, но и в области полутени и тени. Предложена модель рефракционной атмосферы, которая позволяет рассчитывать градиент коэффициента преломления атмосферы.

Ключевые слова: *электромагнитная совместимость, условия распространения радиоволн.*

METHOD OF COMPUTATION OF DISTANCE OF THE MUTUAL INFLUENCING OF RADIO ELECTRONIC TOOLS TAKING INTO ACCOUNT THE TERMS OF DISTRIBUTION OF RADIO WAVES

S.V. Zakirov

A method is offered of computation of distance of the mutual influencing of radio electronic tools which takes into account terms of distribution of radio waves. The offered method allows to conduct computations of distance of the mutual influencing RES not only in area of direct visibility, but also in area of penumbra and shade. A model is offered of refraction atmosphere, which allows to calculate a gradient of coefficient of refraction of atmosphere.

Keywords: *electromagnetic compatibility, terms of distribution of radio waves.*