УДК 629.7356.05:621.396.676 (045)
0561.1

В.О. Іванов, д-р техн. наук
О.А. Моргун

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗВ'ЯЗКУ АНТЕН РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ ЛІТАКІВ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: lvb@nau.edu.ua

Запропоновано загальний алгоритм розрахунку коефіцієнта непередбаченого електромагнітного зв'язку між антенами літака незалежно від їх типів, місцеположення та робочих частот. Наведено формули для розрахунку окремих проміжних показників, що використовуються на відповідних етапах реалізації алгоритму.

Постановка проблеми

Металевий фюзеляж впливає на процеси збудження радіохвиль та їх прийому антенами бортових радіоелектронних засобів (РЕЗ). Тому задача вибору місцеположення бортових антен на ньому виникає завжди в процесі створення нових літаків та модернізації вже існуючих. Випромінювання антени одного РЕЗ є завадою для всіх інших засобів і систем. З метою забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) РЕЗ коефіцієнт електромагнітного зв'язку (КЕЗ) β_{12} між парою бортових антен, який у такому випадку є небажаним і непередбаченим, не повинен перевищувати наперед заданого значення коефіцієнта β.

Аналіз останніх досліджень

Звісні методики розрахунків допустимого КЕЗ на частоті завади [1–3] недосконалі, оскільки передбачають великий обсяг розрахунків, інколи надмірних та доволі наближених, які потребують проведення додаткових дорогих експериментальних випробовувань на дослідних зразках літаків. Тому розробка відносно простої, але достатньо точної інженерної методики попередньої оцінки КЕЗ між парою бортових антен, яка б скоротила або дозволила повністю відмовитися від експериментального визначення рівня непередбаченого зв'язку між антенами, є задачею, що потребує вирішення.

Загальну формулу для оцінки КЕЗ двох антен літака формально можна зобразити так:

$$\beta_{12} = L + O_d + G_{\text{прд}} + G_{\text{прм}} + K_{\text{пол}} + K_{\text{ф1}} + K_{\text{ф2}} + C_1 + C_2 + Z_{\text{кр}}, \quad (1)$$

де β_{12} – коефіцієнт зв'язку двох антен на частоті завади; L – ослаблення завади через просторове рознесення антен; O_d – ослаблення завади, обумовлене дифракцією електромагнітної хвилі на конструктивних елементах літака; $G_{\text{прд}}$, $G_{\text{прм}}$ – коефіцієнт підсилення антени в напрямку променя, що пов'язує дві антени по найкоротшій відстані на частоті завади; $K_{\text{пол}}$ – ослаблення завади, обумовлене розбіжністю типів поляризації антен; $K_{\text{ф1}}$, $K_{\text{ф2}}$ – ослаблення завади у фідерних трактах; C_1, C_2 – поправочні коефіцієнти для антен; $Z_{\text{кр}}$ – ослаблення завади за рахунок екрануючої дії крил.

Завдання

За формулою (1) можна розрахувати КЕЗ між антенами, що розташовані на фюзеляжі літака, якщо звісні всі її складові. Необхідно вдосконалити способи розрахунку деяких складових формули (1) для прискорення їх розрахунку на персональному комп'ютері з використанням сучасного програмного забезпечення, а також створити алгоритм розрахунків, зручний для програмування на сучасних мовах програмування. При цьому слід зберегти фізичний зміст складових формули (1) та не збільшити величину похибки.

Алгоритм розрахунку КЕЗ повинен бути незалежним від типів антен, їх місцеположення на літаку, параметрів фюзеляжу та частоти завади. Такий загальний алгоритм має стати базовим елементом (головною підпрограмою) більш загальних алгоритмів, спрямованих на розв'язання таких завдань, як комплексна оцінка ЕМС на борту літака та оптимізація розташування антен на поверхні фюзеляжу.

Отримані результати

Відповідно до розробленого алгоритму, блок-схему якого зображено на рис. 1, методика прогнозуючої оцінки КЕЗ реалізується за такими етапами.

1. Для прив'язки фюзеляжу до системи координат корпус літака апроксимуємо круговим циліндром. Місцеположення антен з реальної поверхні переносимо на поверхню циліндра. Корпус літака пов'язуємо з прямокутною лівогвинтовою системою координат із горизонтальною віссю X, вертикальною віссю Y та віссю Z, збіжною з подовжньою віссю літака. За позитивний напрям осі Z беремо напрям від носа до кіля літака. Початок координат збігається з початком носової частини літака. Така система координат використовується у нормативній та технічній документації авіаційних підприємств (рис. 2) і залишається незмінною для розрахунку всіх складових, що входять до формули (1).

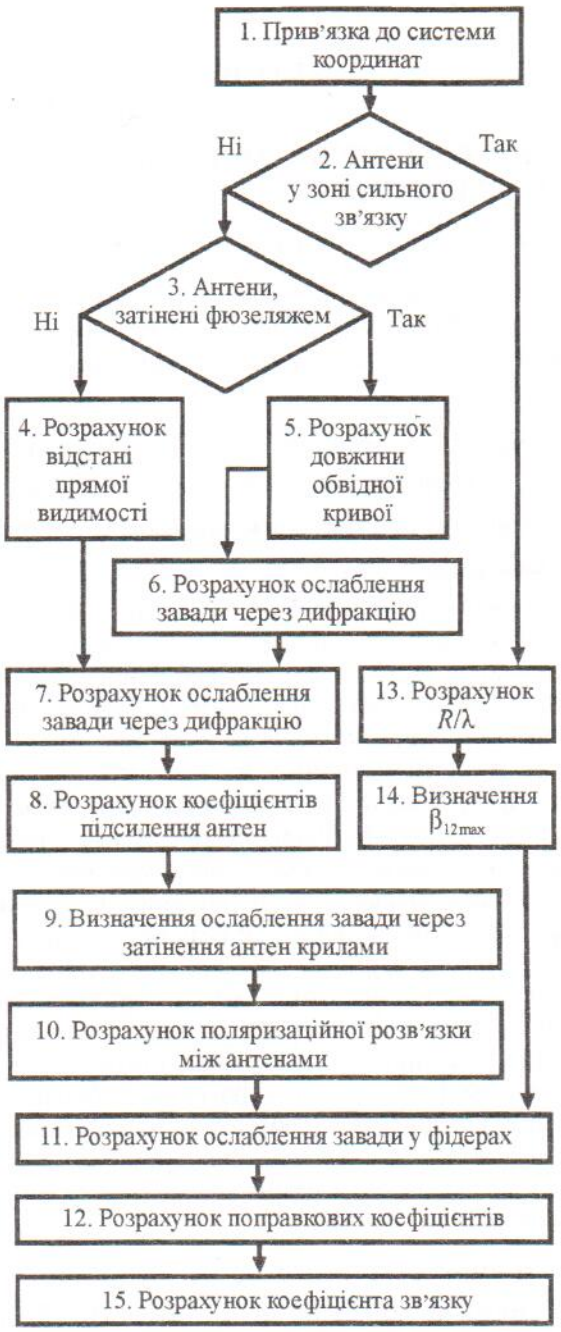

Рис. 1. Алгоритм обчислення КЕЗ між двома антенами

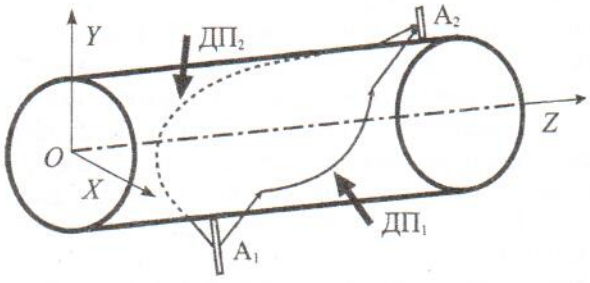

Рис. 2. Коротка ($ДП_1$) та довга ($ДП_2$) траєкторії дифракційних променів

2. При визначенні способу взаємодії антен ураховуємо, що електромагнітне поле поблизу поверхні фюзеляжу має складний характер, обумовлений протіканням струмів провідності не тільки в антені, але і по поверхні фюзеляжу. Їх амплітуди швидко спадають по мірі віддалення від антени [4], тому їх вплив на параметри антени достатньо враховувати на відносно невеликій відстані від антени. Довжина відстані залежить від довжини хвилі, особливостей форми поверхні, на якій розташована антена та геометричних розмірів цієї поверхні. Відповідно спосіб взаємодії та величина КЕЗ пари антен залежить від того, чи потрапляє приймальна антена до зони впливу наведених поверхневих струмів навколо передавальної антени, чи ні. У випадку потрапляння зв'язок між антенами є сильним, інакше – слабким. Якщо антени розташовані на поверхні кругового циліндра, розміри зони ближнього впливу залежать від його радіуса. Умова потрапляння антени до цієї зони надається формулою:

$$\eta = ((\lambda > R) \cup (\lambda_p > R)) \cup ((\lambda > R/2) \cap \left(\lambda > \frac{|z_2 - z_1|}{2}\right), \quad (2)$$

де R – радіус фюзеляжу; λ – довжини хвиль завади; λ_p – робоча довжина хвилі; z_1, z_2 – координати точок розташування антен.

Знак рівності означає логічну операцію, тому параметр η дорівнює одному при виконанні умови в правій частині виразу (2) – потраплянні антен до зони ближнього впливу – і нулю, якщо навпаки.

3. Наявність чи відсутність затінення антен фюзеляжем визначимо за умови розташування приймальної антени за межами зони впливу наведених струмів (у зоні слабкого зв'язку). Для цього фазові центри антен з'єднуємо прямолінійним відрізком. Якщо цей відрізок буде перетинати циліндр, що є моделлю фюзеляжу, то антени знаходяться в зоні тіні. Розв'яжемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} R^{22} = x^2 + y^2; \\ \dfrac{x - x^2}{x_2 - x_1} = \dfrac{y - y_2}{y_2 - y_1} = \dfrac{z - z_2}{z_2 - z_1}, \end{cases} \quad (3)$$

де y_2, y_1, x_2, x_1, z_2, z_1 – координати точок розташування відповідних антен.

Перше рівняння системи (3) описує просторовий циліндр, друге – пряму, яка проходить через фазові центри антен. Виразивши x через y, отримаємо квадратне рівняння з коефіцієнтами A, B, C:

$$Ay^2 + By + (C - R^2) = 0, \quad (4)$$

де $A = 1 + a^2$;

$B = -2y_2a^2 + 2x_2a$;

$C = x^2 + y^2a^2 - 2x_2y_2a$;

$$a = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}.$$

Якщо дискримінант Д рівняння (4) більше нуля, пряма пересікає циліндр. При цьому необхідно врахувати, що корені рівняння z_{p1}, z_{p2} повинні набувати значення на інтервалі $(z_1; z_2)$, тобто антени знаходяться в освітленій зоні, а не у зоні тіні.

Отже, умови знаходження антен у зоні тіні фюзеляжу можна виразити так:

$$\begin{cases} Д > 0; \\ z_{p1}, z_{p2} \in (z_1; z_2). \end{cases}$$

4. Довжину шляху D між антенами розрахуємо за відсутності затінення антен фюзеляжем (відстань прямої видимості):

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}.$$

5. Для визначення відстані між антенами під час затінення антен фюзеляжем розрахуємо КЕЗ антен, що розташовані в зоні тіні або напівтіні. Для цього використаємо один з евристичних методів теорії дифракції – метод дифракційних променів (метод Келлера) [4]. Цей метод базується на узагальненому принципі Ферма про можливість поширення електромагнітної енергії вздовж дифракційних променів (ДП). Під ДП розуміють промені, що з'єднують за найкоротшим шляхом джерело поля та точку спостереження і мають при цьому спільну частину гладкої просторової кривої з відбиваючою поверхнею або спільну точку з відбиваючим ребром. У випадку відбиття хвилі від криволінійної поверхні ДП складається з трьох частин: промінь поширюється від фазового центру передавальної антени по дотичній до поверхні циліндра, далі – по поверхні циліндра (по дузі циліндричної спіралі) і потім по прямій лінії до фазового центру приймальної антени (рис. 2).

На рис. 2 показано форми траекторій, уздовж яких поширюється промінь електромагнітної хвилі (ЕМХ).

Таких траекторій завжди дві: по одному і другому боках фюзеляжу. Для визначення послаблення завади при поширенні ЕМХ у зоні тіні за рахунок дифракції необхідно визначити довжину D коротшої криволінійної траєкторії, яка є довжиною шляху між антенами, а також довжину S_1 її криволінійної частини. Ці розрахунки доволі громіздкі, тому вони випущені.

6. Ослаблення завади, обумовлене ефектом затінення антен фюзеляжем O_d, визначимо за формулою, що випливає з особливостей використання методу Келлера [2; 3]:

$$O_d = \begin{cases} -\dfrac{q}{(3{,}34q + 5{,}621)\cdot 10^{-3}}, & q \geq 26; \\ -\dfrac{q}{(5{,}476q + 5{,}083)\cdot 10^{-3}}, & q < 26; \end{cases}$$

$$q = R\Theta^2 \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda S_1}},$$

де Θ – центральний кут між антенами.

7. Послаблення сигналу, обумовлене просторовим рознесенням антен, визначимо за умови знаходження антен у вільному просторі. Таке послаблення виражається різницею L відносних потужностей P_2 та P_1 на вході приймача та виході передавача відповідно. Необхідну формулу отримаємо з відомого рівняння радіозв'язку (ідеальної радіопередачі) за умови рівності коефіцієнтів підсилення антен одиниці при переході до логарифмічної відносної форми запису:

$$L = P_2 - P_1 = 20\lg\left(\frac{\lambda}{D}\right) - 21{,}984.$$

8. Для визначення коефіцієнтів підсилення антен використаємо дворівневу модель коефіцієнта підсилення: по головним G_{oc} і бічним G_b пелюсткам. За наявності таких даних у технічному описанні РЕЗ скористаємося ними, а за відсутності розрахуємо їх за формулами:

$$G_{прд(прм)} = \begin{cases} G_{oc\,1(2)} = 10\lg\left(\dfrac{4\pi}{2\Delta\theta_{1(2)} 2\Delta\varphi_{1(2)}}\right); \\ G_{b\,1(2)} = -8{,}3 - G_{oc\,1(2)}, \end{cases}$$

де $\Delta\theta_{1(2)}, \Delta\varphi_{1(2)}$ – половина ширини діаграми спрямованості антени (ДСА) по половинній потужності у вертикальній і горизонтальній площинах відповідно до антен передавача та приймача.

Для визначення коефіцієнта підсилення антен у напряму взаємодії необхідно розрахувати плоский кут у просторі між центральним променем ДСА та дотичною до поверхні циліндру, якщо фюзеляж затінює антени, або променем, що пов'язує фазові центри антен по прямій лінії за наявності прямої видимості.

9. Ослаблення завади, обумовлене ефектом затінення антен крилами літака, визначимо згідно алгоритму (рис. 3). Антени затінені крилами літака за умови перетину дифракційного променя з одним або з обома з крил літака. Отже, КЕЗ розраховуємо за довгою траєкторією під час затінення крилом короткої траєкторії або під дифракційного променя й зменшуємо його на 25 дБ щодо час затінення крилами обох шляхів значення КЕЗ, розрахованого за довгою траєкторією.

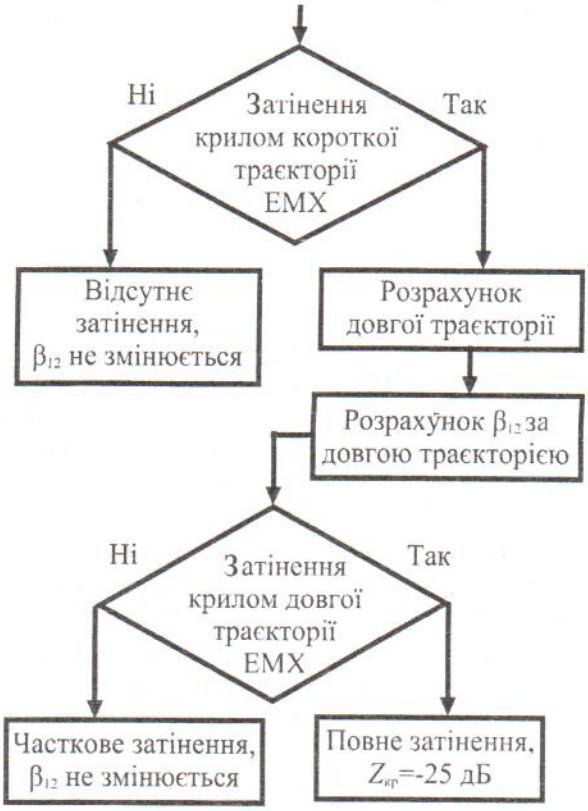

Рис. 3. Алгоритм розрахунку ефекту затінення антен крилами літака

10. Урахування розходження поляризації антен за умови знаходження їх у вільному просторі (не на фюзеляжі) виражається виправленням, унесеним у рівень сигналу, що заважає.

Значення виправлення залежить від типу використовуваних антен. Якщо зведення про конкретні поляризаційні розв'язки антен відсутні, то необхідні виправлення можуть бути взяті з дослідних даних, наведених у таблиці. Вони відповідають усередненим виправленням, отриманим статистичною обробкою результатів натурних вимірів.

Матриця *P* розходження поляризації

A1	A2		
	В	Г	К
В	0	–16	–3
Г	–16	0	–3
К	–3	–3	0

Тип поляризації антени задається літерами *i* та *j* для однієї та іншої антени відповідно. Наприклад, коефіцієнт ослаблення радіоперешкоди за рахунок розходження поляризації двох антен набуває вигляду:

$$K_{пол} = P_{i,j} = P_{1,2} = -3,$$

де $P_{i,l}$ – звертання до елемента матриці P, яка утворена табличними значеннями.

Це означає, що одна антена має горизонтальну, а інша кругову поляризацію. У матриці P літерами В, Г, К позначено відповідно вертикальну, горизонтальну та кругову поляризацію.

11. Втрати у фідерах урахуємо, посилаючись на параметри фідерних пристроїв, які записані в технічній документації. За відсутності такої інформації користуються довідниками, а також формулою, за якою можна розрахувати коефіцієнт ослаблення завади у фідерному тракті:

$$K_{ф1(2)} = -10\lg(\mathrm{ch}(2\beta t_{1(2)}) + $$
$$+ 0{,}5\left(K_{o1(2)} + \frac{1}{K_{o1(2)}}\right)\mathrm{sh}(2\beta t_{1(2)})),$$

де β – коефіцієнт затухання у фідері, 1/м; t_1, t_2, – довжини фідерів; $K_{o1(2)}$ – коефіцієнти біжучої хвилі.

12. Поправкові коефіцієнти для врахування зміни випромінюючої і приймальної здатності несиметричних вібраторних антен при зміні частоти завади визначимо за графіком залежності додаткового ослаблення завади від відношення фізичної висоти антени до довжини хвилі завади (рис. 4).

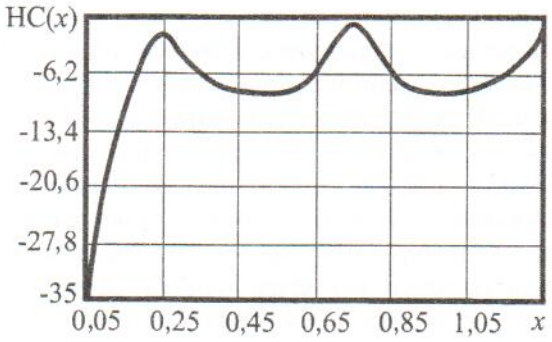

Рис. 4. Поправкові коефіцієнти для несиметричних вібраторів

Поправкові коефіцієнти показують, наскільки зменшиться потужність завади на затисках антени у разі відхилення частоти завади від резонансної для даної антени. Фактично таким чином ураховується розходження між оптимальною електричною довжиною антени та її електричною довжиною на частоті завади.

Для автоматичності виконання методики графік був апроксимований сплайновими функціями третього порядку, що являють собою відрізки поліномів третього степеня, "зшиті" між собою у вузлових точках.

Аргумент функції x – відношення еквівалентної висоти антени до довжини хвилі.

Еквівалентну висоту антени визначають за формулою

$$h_i = h_{вi} + h_{ei},$$

де $h_{вi}$ – фізична висота антени; h_{ei} – еквівалентне подовження антени, яке враховує наявність горизонтальної частини антени $h_{гi}$.

Це еквівалентне подовження для Т-подібної антени розраховують за формулою

$$h_{ei} = \frac{\lambda}{2\pi}\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{2}\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi h_{гi}}{\lambda}\right)\right),$$

а для Г-подібної антени:

$$h_{ei} = h_{pi}.$$

Ослаблення завади визначають за виразом

$$C_{1(2)} = \text{НС}(h_i/\lambda).$$

13. Відношення радіуса фюзеляжу до довжини хвилі розрахуємо за рівнянням

$$k = R/\lambda.$$

14. Максимальне значення КЕЗ β_{12max} двох антен визначимо за умови їх розташування в зоні впливу наведених у фюзеляжі струмів (у зоні сильного зв'язку) залежно від отриманого значення k. Для цього застосуємо загальний розв'язок задачі про збудження нескінченного ідеально провідного циліндра [6]. Максимальне значення КЕЗ визначається для чвертьхвильових вібраторів без урахування ослаблення сигналу у фідерному тракті.

15. Коефіцієнти електромагнітного зв'язку пари бортових антен розрахуємо за формулою (1), підставивши до неї всі її складові. У випадку розташування антен у зоні впливу наведених у фюзеляжі струмів їх КЕЗ слід розрахувати за спрощеною формулою

$$\beta_{12} = \beta_{12max} + K_{ф1} + K_{ф2} + C_1 + C_2.$$

Висновки

Запропонований єдиний алгоритм розрахунку КЕЗ двох антен бортових РЕЗ ураховує практично всі фактори, що впливають на величину небажаного зв'язку між бортовими антенами. Алгоритм, зведений до вигляду, стандартного для написання комп'ютерних програм, має "відкриту" структуру, тобто оцінку впливу кожного фактора виділено в окремий пункт, незалежний від інших пунктів. Завдяки цьому будь-які подальші вдосконалення способу розрахунку окремих проміжних величин можуть бути легко реалізовані у рамках запропонованого алгоритму заміною однієї підпрограми іншою.

Список літератури

1. *Ильницкий Л.Я., Иванов В.А., Сибрук Л.В., Анисифоров А.С.* Коэффициент электромагнитной связи между функционально независимыми антеннами //Контроль и управление техническим состоянием авиационного и радиотехнического оборудования воздушных судов гражданской авиации: Сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1986. – 112 с.

2. *Шатраков Ю. Г., Ривкин М.И., Цыбаев Б.Г.* Самолетные антенные системы. – М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.

3. *Ибатуллин Э.А.* Электромагнитная совместимость антенн на подвижном объекте //Третий междунар. симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Сб. науч. докл., 23–27 июня 1997. – С. Пб.: СПГЭУ, 1997. – С. 79–83.

4. *Резников Г.Б.* Самолетные антенны. – М.: Сов. радио, 1962. – 455 с.

5. *Хенл Х. , Мауэ А., Вестпфаль К.* Теория дифракции: Пер. с нем./ Под ред. Г.Д. Малюжинца. – М.: Мир, 1964. – 428 с.

6. *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. – 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1983. – 295 с.

Стаття надійшла до редакції 11.04.03.

В.А. Иванов, А.А. Моргун

Алгоритм расчета коэффициента электромагнитной связи антенн радиоэлектронных средств самолетов

Предложен общий алгоритм расчета коэффициента непредусмотренной электромагнитной связи между антеннами самолета независимо от их типов, местоположения и рабочих частот. Приведены формулы для расчета отдельных промежуточных показателей, используемых на соответствующих этапах реализации алгоритма.

V.O. Ivanov, O.A. Morgun

Algorithm of calculation of electromagnetic coupling coefficient of antennas of airplane radio-electronic facilities

It is offered the general algorithm of calculation of electromagnetic coupling unforeseen coefficient between airplane antennas independently of their types, positions and operation frequencies. It is adduced formulas for calculation of certain intermediate indexes, which are used in corresponding stages of algorithm realization.