

АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 621.396.6(045)

В.П. Харченко¹
Ю.М. Барабанов²
А.М. Грехов³
Д.І. Терещенко⁴**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛІНЕАРНОЇ АНТЕНИ
ПРИЙМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ADS-B ЧИСЛОВИМИ МЕТОДАМИ**Національний авіаційний університет
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680
E-mails: ¹kharch@nau.edu.ua; ²brbnv@i.ua; ³grekhovam@ukr.net; ⁴tedmiv@gmail.com

Виконано розрахунки напруженості електромагнітного поля та діаграм спрямованості колінеарної антени на основі методу моментів з використанням двох програмних комплексів. Після порівняння зазначено високий рівень збіжності результатів. Побудовано зразок антени, яка використовується в діючій системі для приймання ADS-B сигналів бортових відповідачів літаків.

Ключові слова: діаграма спрямованості; колінеарна антена; метод моментів; напруженість електромагнітного поля; система інтегральних рівнянь; система для приймання ADS-B сигналів; спостереження за повітряним рухом.

Постановка проблеми

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) – нова технологія спостереження за повітряним рухом, яка впроваджується на території Європи, США та інших країн. Програма EUROCONTROL CASCADE координує впровадження технології ADS-B у Європі [5].

Актуальними завданнями є ознайомлення з цією новою технологією студентів, побудова простої системи для приймання ADS-B сигналів та спостереження з її допомогою за повітряним рухом.

Наземна система, що приймає ADS-B сигнали від бортових транспондерів режиму S на частоті 1090 МГц, може використовуватися як віртуальний радар для створення в реальному часі картини повітряного трафіку і складається з чотирьох компонентів:

- антени;
- приймача;
- декодера;
- програмного забезпечення комп'ютера.

Для створення діючого зразка наземної системи ADS-B необхідно дослідити характеристики антени, яка приймає сигнали від бортових транспондерів у режимі S.

Аналіз досліджень і публікацій

Для розрахунків напруженості електромагнітного поля і відповідних діаграм спрямованості

антен використовують числові методи електродинаміки, зокрема метод моментів, у якому металеві елементи антени замінюють еквівалентними поверхневими електричними струмами і створюють еквівалентну сіткову модель об'єкта [1]. Потім розраховують електромагнітне поле, яке було створено цими струмами.

Для розв'язання проблеми поверхню металу розбивають на елементарні сегменти, а електричний струм у межах сегмента уявляють у вигляді розподілу струму на базисні функції з ваговими коефіцієнтами [2–4].

У програмному комплексі, розробленому в Національному авіаційному університеті [3], для апроксимації струму використовуються кусково-постійні базисні функції і вздовж металевого проводу зі струмом накладаються граничні умови для електромагнітного поля.

У результаті виконання граничних умов у дискретних точках отримують систему інтегральних рівнянь стосовно коефіцієнтів при базисних функціях, які є амплітудами струмів у межах елементарного сегмента.

Систему рівнянь у програмі [3] розв'язують стосовно взаємозалежних струмів з використанням методу Краута [1].

Точність методу моментів тим вища, чим менший розмір елементарного сегмента. Вважається, що для досягнення прийнятної точності розмір сегмента не повинен перевищувати $\lambda/10$, де λ – довжина хвилі у вільному просторі.

Кількість інтегральних рівнянь у програмі дорівнює кількості елементарних сегментів N , яка збільшується зі збільшенням розмірів об'єкта або з підвищенням частоти. Тому вирішення завдання розсіяння радіохвиль на об'єкті за допомогою методу моментів потребує розв'язання системи інтегральних рівнянь у матричній формі великої розмірності.

Метою роботи є:

- дослідження електромагнітного поля випромінювання колінеарної антени за допомогою програми [3] методом моментів;
- створення експериментального зразка антени наземної системи ADS-B для приймання сигналів на частоті 1090 МГц бортових відповідачів літаків у режимі Mode S;
- виконання аналізу результатів натурних випробувань створеної наземної приймальної системи ADS-B у цілому.

Послідовність розрахунку діаграми спрямованості колінеарної антени

Вектор напруженості електричного поля, яке збуджується електродинамічним об'єктом, у загальному випадку визначають векторною сумою проєкцій:

$$\bar{E}_\Sigma = \bar{l}_r E_{r\theta\Sigma} + \bar{l}_\theta E_{\theta\Sigma} + \bar{l}_\varphi E_{\varphi\Sigma}.$$

Для числового розрахунку за методом моментів колінеарну антену поділяють на N сегментів, довжина z кожного з яких значно менша від довжини хвилі.

Комплексні амплітуди окремих складових вектора \bar{E}_Σ у дальній зоні випромінювання будь-якого сегмента моделі визначають такими співвідношеннями [1]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_\theta = & -i \frac{\dot{k}^2}{\omega \epsilon} G(z, z') \{ r_2 [\sin \theta_2 \cos \theta \cos(\varphi_2 - \varphi) - \\ & - \cos \theta_2 \sin \theta_2] - r_1 [\sin \theta_1 \cos \theta \cos(\varphi_1 - \varphi) + \\ & + \cos \theta_1 \sin \theta] \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_\varphi = & -i \frac{\dot{k}^2}{\omega \epsilon} G(z, z') [r_2 \sin \theta_2 \sin(\varphi_2 - \varphi) - \\ & - r_1 \sin \theta_1 \sin(\varphi_1 - \varphi)]; \end{aligned}$$

$$\dot{E}_r \cong 0.$$

Індекси 1 і 2 належать до сферичних координат точок $[r, \theta, \varphi]$, які визначають початок і кінець елементарного сегмента антени з комплексною амплітудою струму \dot{I} :

$$\omega = 2\pi f;$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda};$$

$$G(z, z') = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r};$$

$$r = \sqrt{(z - z')^2 + a^2};$$

де z – координата точки спостереження на поверхні;

z' – координата точки на осі елемента сіткової моделі довжиною L , у якій розміщено парціальне джерело лінійного струму:

$$I(z') = \int_L j(z) dz;$$

a – радіус стрижня антени.

Процедура визначення струмів в елементах моделі полягає у числовому розв'язанні рівняння Поклінгтона [2]:

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(z') \left[\frac{\partial^2 G(z, z')}{\partial z'^2} + k^2 G(z, z') \right] dz' = \\ = -i\omega \epsilon E_z^i(z). \end{aligned} \quad (1)$$

Розв'язуючи рівняння (1) згідно з методом моментів, невідомі розподіли струмів $I(z')$ вздовж осі z будь-якого фрагмента моделі розкладають за системою обраних базисних функцій $J_n(z')$:

$$I(z') = \sum_{n=1}^N I_n J_n(z'),$$

де невідомі постійні коефіцієнти I_n підлягають визначенню. Після цього інтегральне рівняння Поклінгтона набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N I_n \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} j_n(z') \left[\frac{\partial^2 G(z, z')}{\partial z'^2} + k^2 G(z, z') \right] dz' = \\ = -i\omega \epsilon E_z^i(z). \end{aligned}$$

Ураховуючи вагові функції W_m взаємного впливу m -го елемента моделі на n -й елемент моделі отримуємо:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N I_n \int_{L_n} \int_{L_m} W_m(z) j_n(z') \left[\frac{\partial^2 G(z, z')}{\partial z'^2} + \right. \\ \left. + k^2 G(z, z') \right] dz' dz = -i\omega \epsilon \int_{L_m} W_m(z) E_z^i(z) dz. \end{aligned}$$

Згідно з методом Гальоркіна вагові функції W_m вибирають такими самими, як і базисні функції $J_m(z')$:

$$W_m = J_m(z').$$

Підінтегральна частина рівняння Поклінгтона має розмірність опору, позначається як Z_{mn} і називається узагальненим імпедансом. Права частина рівняння Поклінгтона є узагальненою напругою збудження U_m . Отримана система рівнянь у матричній формі має вигляд

$$[Z] \times [I] = [U],$$

де $[Z]$ – матриця узагальнених імпедансів;

$[I]$ – матриця-стовпець невідомих коефіцієнтів розкладання струмів моделі об'єкта;

$[U]$ – матриця-стовпець джерел збудження.

Систему рівнянь у матричній формі розв'язують з використанням спеціальних програм після її транспонування:

$$[I] = [Z]^{-1} \times [U],$$

або перетворення до еквівалентної системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{Y}_{11}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{1q}\dot{U}_p \\ \dot{I}_2 &= \dot{Y}_{21}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{2q}\dot{U}_p \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \dot{I}_p &= \dot{Y}_{p1}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{p2}\dot{U}_2 + \dots + \dot{Y}_{pq}\dot{U}_p \end{aligned} \right\}$$

де \dot{I}_p – амплітуда і фаза струму, що протікає через затискачі p -го елемента моделі антени;

\dot{Y}_{pq} – взаємна комплексна провідність між p -м і q -м елементами;

\dot{U}_p – амплітуда і фаза напруги на затискачах p -го елемента.

Система рівнянь у програмі була розв'язана стосовно взаємозалежних струмів на основі методу Краута. Їх значення застосовано для визначення модулів комплексних проекцій результуючого вектора напруженості електричного поля та їх нормованих значень [4].

Наведені у працях [1; 4] співвідношення становлять основу розрахункової частини програми [1] для обчислення напруженості поля випромінювання та діаграми спрямованості антени за методом моментів.

Розрахунки діаграми спрямованості

Перш за все були визначені вимоги до антени наземної системи ADS-B і обрано конструкцію колінеарної антени.

Антенна наземної частини системи для приймання ADS-B сигналів повинна забезпечувати в горизонтальній площині кругову діаграму спрямованості з вертикальною поляризацією поля.

Дальність дії системи по каналу відповіді вторинного радіолокатора режиму S має забезпечувати максимальну зону обслуговування центра керування повітряним рухом не меншу від відстані прямої видимості. Тому для забезпечення високого коефіцієнта підсилення у вертикальній площині вибрано колінеарну антену у вигляді трьох синфазних півхвильових відрізків дроту, між якими встановлюються два фазозсувні коліна довжиною $\lambda/2$ для забезпечення синфазного збудження вібраторів.

Поле випромінювання колінеарної антени обчислено за допомогою програм [2; 3] і порівняно результати.

Початкові дані для розрахунку поля випромінювання були ідентичні. Розглянуто випадок розташування антени над поверхнею землі з такими характеристиками: відносна діелектрична проникність $\epsilon = 9,0$ і питома провідність підстильної поверхні відповідно $\gamma = 0,01$ (Ом·м)⁻¹.

В обох програмах використовувався метод моментів з розбиттям провідників антени на елементарні сегменти.

Програма [3] дозволяє виконувати розрахунки з постійною кількістю сегментів.

У програмі MMANA-GAL [2] можна обирати змінну щільність сегментів від 40 до 4000 вздовж антени.

Для порівняння результатів кількість сегментів становила 400. Антену встановлено на висоті $\lambda/10$ над поверхнею землі.

Обрану конфігурацію антени показано на рис. 1. Як фазозсувний елемент антени взято виток дроту довжиною $\lambda/2$, який апроксимовано восьмикутником (рис. 2, а).

Під час моделювання антени досліджувались різні витки дроту: від плаского витка до спіралі з кроком зростання по осі OZ (0,01...0,1) λ . Найменшу паразитну горизонтальну складову поля дають пласкі витки дроту з ортогональними напрямками намотки.

Інтерфейс програми [3], який використовувався для введення параметрів розрахунків та геометрії антени, показано на рис. 3.

Результати розрахунків діаграми спрямованості колінеарної антени для підстилкової поверхні з параметрами $\epsilon = 9,0$ і $\gamma = 0,01$ (Ом·м)⁻¹ наведено в таблиці.

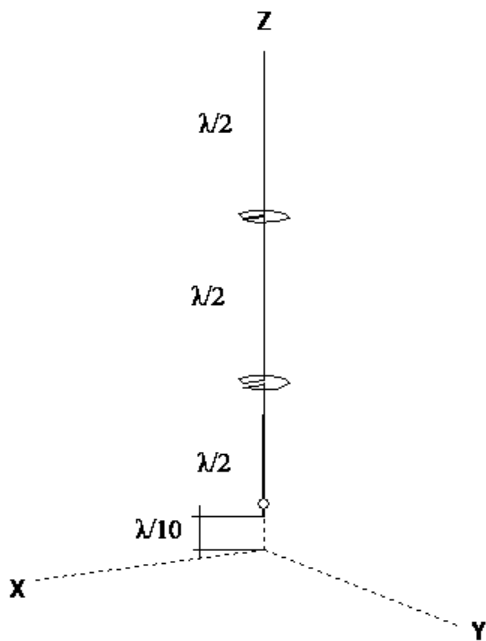


Рис. 1. Електронна модель колінеарної антени в тривимірному просторі

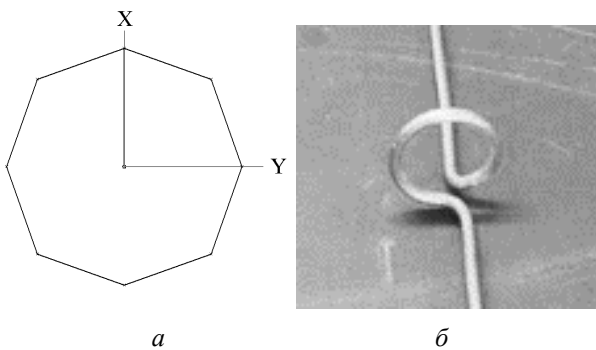


Рис. 2. Колінеарна антена:
а – електронна модель антени в площині XOY;
б – фрагмент виготовленого зразка антени

У програмах [2; 3], для яких порівнюються результати, використовуються різні методи оброблення вихідних даних при розрахунках полів, у програмі [3] – два методи нормування модуля напруженості електричного поля і діаграми спрямованості виводяться в лінійному масштабі, зокрема метод локального нормування в межах однієї із площин аналізу діаграми спрямованості полів за всіма окремими розрахунками. При цьому максимум модуля напруженості електричного поля дорівнює 1,0 у відносних одиницях.

У програмі [2] використовується лише метод логарифмічно локального нормування модуля вектора напруженості електричного поля. Для порівняння результатів розрахунку програма [3] переведена в режим локального нормування.

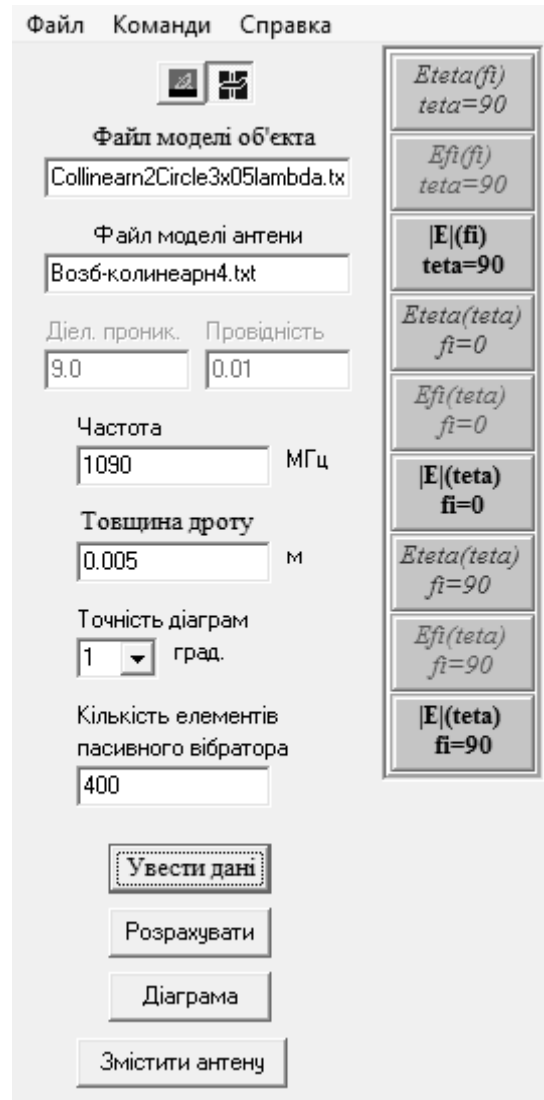


Рис. 3. Інтерфейс програми

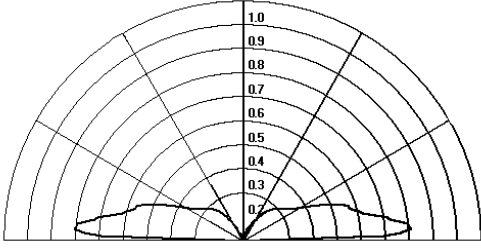
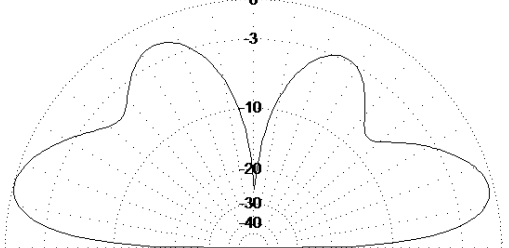
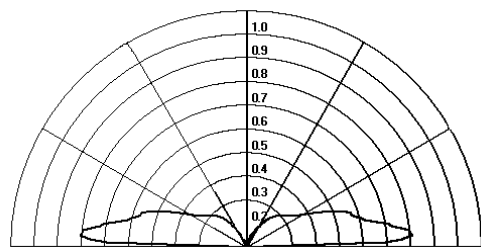
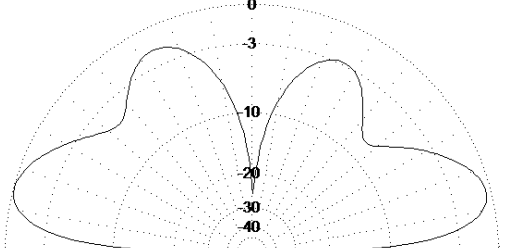
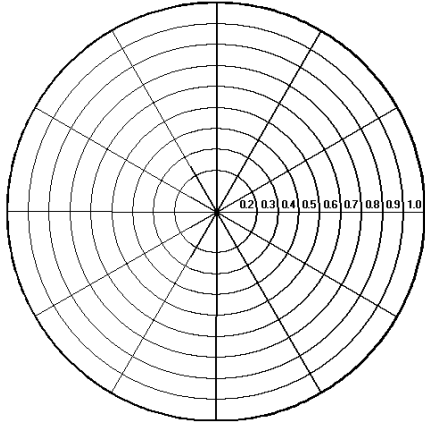
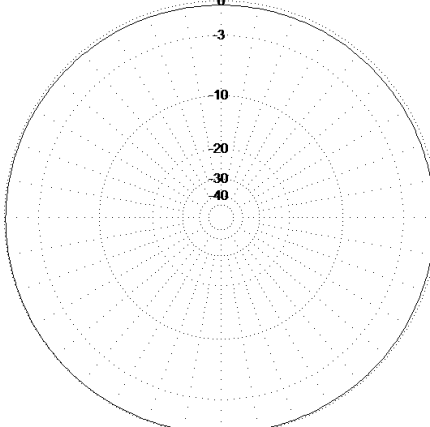
За допомогою досконалого графічного інтерфейсу програми [2] проаналізовано характер зміни діаграми спрямованості під час переходу від ідеально провідної до реальної підстилкової поверхні. Діаграма спрямованості значно поліпшується за рахунок зменшення «провалів» (рис. 4).

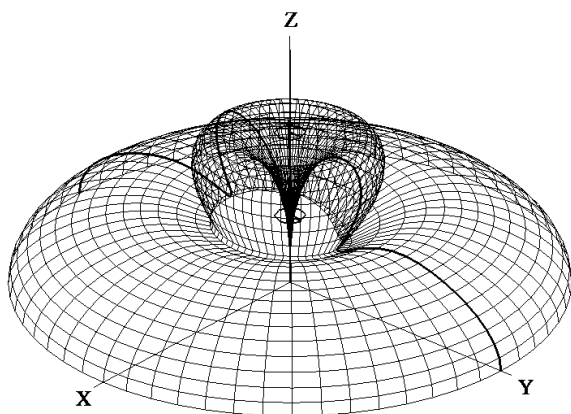
Експериментальний зразок антени

На підставі виконаних розрахунків було виготовлено колінеарну антену (рис. 2, б) з мідного дроту діаметром 5 мм, в якій між півхвильовими елементами для забезпечення синфазного живлення включено фазозсувні елементи (горизонтальні витки дроту завдовжки $\lambda/2$).

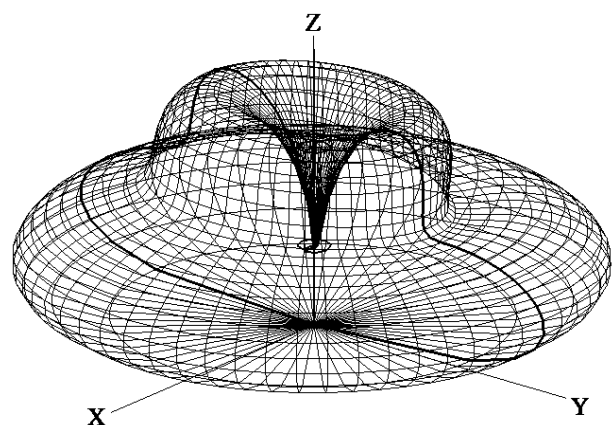
Вони унеможливають формування струмів протилежного напрямку на елементах колінеарної антени.

Діаграма спрямованості колінеарної антени

Складові вектора \vec{E}_Σ	Програма Національного авіаційного університету (масштаб лінійний)	Програма MMANA-GAL (масштаб логарифмічний)
Складова електричного поля у вертикальній площині XOZ $E_\theta(\theta) _{\varphi=0^\circ}$		
Складова електричного поля у вертикальній площині YOZ $E_\theta(\theta) _{\varphi=90^\circ}$		
Складова електричного поля у горизонтальній площині XOY $E_\theta(\varphi) _{\theta=90^\circ}$		



a



б

Рис. 4. Тривимірні діаграми спрямованості колінеарної антени за програмою MMANA-GAL для ідеально провідної підстилкової поверхні (a) та підстилкової поверхні з параметрами $\epsilon = 9,0$ і $\gamma = 0,01$ (Ом·м)⁻¹

Це забезпечує синфазне живлення вертикальних елементів антени та формування бажаної форми діаграми спрямованості антени у вертикальній площині з нахилом головної пелюстки діаграми вздовж землі. Під кутом місця 16° коефіцієнт підсилення антени становить $G_v = 0,1$ дБ.

Для компенсації горизонтальної складової електромагнітного поля використано право- та лівозахідні витки дроту першого і другого фазозсувних елементів. Така антена є вузькосмуговою.

Для рівня коефіцієнта стоячих хвиль (SWR) меншого за 1,5 ширина смуги частот дорівнює 67,74 МГц (рис. 5).

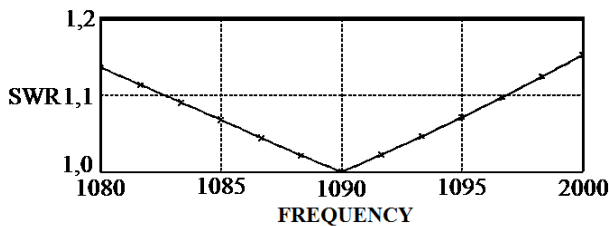


Рис. 5. Залежність коефіцієнта стоячих хвиль від частоти

Розроблена колінеарна антена має задовільне узгодження на частоті 1090 МГц, коефіцієнт вхідного опору $Z = 76,049 - j258,117$ Ом. Вона дозволяє приймати сигнали від бортових відповідачів по каналу розширеного сквітера S для забезпечення функціонування наземного об'єкта системи ADS-B (рис. 6).

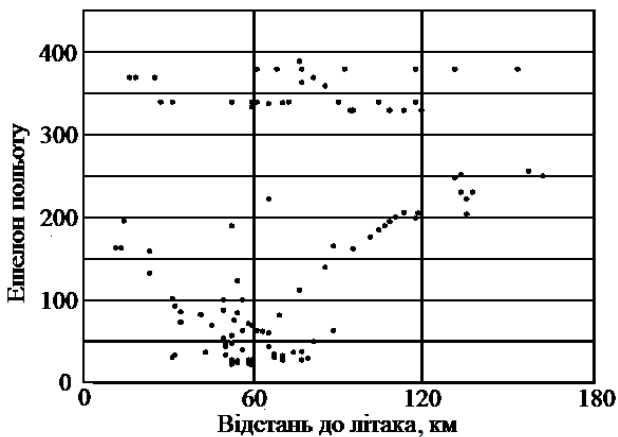


Рис. 6. Залежність максимальної відстані до літаків, при якій відбувається приймання ADS-B сигналів, від ешелону польоту

Виявилось, що антена має невелику «сліпу воронку» і дозволяє відслідковувати літаки «над собою».

Створена антена для приймання ADS-B сигналів дозволила виявити літак і спостерігати за його рухом на значних відстанях (до 600 км) від приймача, що розміщений в Києві на даху учебного корпусу висотою 20 м (рис. 7).

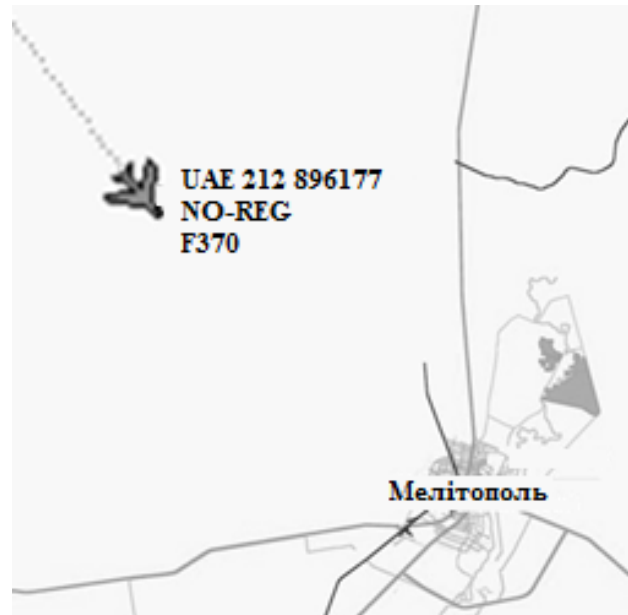


Рис. 7. Фрагмент відображення повітряної обстановки

Висновки

1. Виконано розрахунки напруженості електромагнітного поля і діаграми спрямованості приймальної колінеарної антени.

2. Програми розрахунків напруженості електричного поля дозволяють отримувати близькі результати за формою діаграми спрямованості і проводити якісний аналіз таких діаграм для вертикальної складової поля.

3. Створена наземна приймальна система ADS-B забезпечує значну дальність дії каналу зв'язку «бортовий транспондер – наземний приймач», котрий працює в режимі S на частоті 1090 МГц.

Література

1. *Вычислительные методы в электродинамике* / под ред. Р. Митры. – Москва: Мир, 1977. – 488 с.

2. *Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Часть IV. Направленные антенны КВ: синфазного и продольного излучения* / И.В. Гончаренко. – Москва: ИП РадиоСофт, 2007. – 256 с.

3. *Математичне моделювання впливу металевих конструкцій на характеристики вимірювальних антен: звіт про науково-дослідну роботу. № 006-ДБ01-03.* – К.: Національний авіаційний університет, 2003. – 86 с.

4. *Поле штирової антени, встановленої на корпусі літака* / Ю.М. Барабанов, В.О. Іванов, О.А. Моргун, І.І. Чернявський // *Електроніка та системи управління.* – 2007. – № 3 (13). – С. 88–95.

5. *CASCADE / EUROCONTROL* [Електронний ресурс]. – 04.02.2013 – Режим доступу: <http://www.eurocontrol.int/surveillance/cascade>

References

1. *Calculation methods in electrodynamics*. 1977. Ed. R. Mitra. Moscow, Mir. 488 p. (in Russian).
2. Goncharenko, I.V. 2007. Antenna HF and VHF. Part IV. Directional HF antennas: in-phase and longitudinal radiation. Moscow, IP RadioSoft. 256 p. (in Russian).
3. *Mathematical modeling of metal structures for measuring antenna characteristics*. 2003. Report on research work. N 006-ДБ01-03. Kyiv, National Aviation University. 86 p. (in Ukrainian).
4. Barabanov, Yu.M.; Ivanov, V.O.; Morhun, I.I.; Cherniavskiy, O.A. 2007. *Field whip antenna mounted on the body of the aircraft*. Electronics and control systems. N 3 (13): 88–95 (in Ukrainian).
5. *CASCADE / EUROCONTROL* [Electronic resource]. 04.02.2013. Available from Internet: <<http://www.eurocontrol.int/surveillance/cascade>>.

Стаття надійшла до редакції 03.04.2013.

Харченко Володимир Петрович (1946). Доктор технічних наук. Професор. Заслужений діяч науки і техніки України. Лауреат Державної премії України. Проректор з наукової роботи, Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Завідувач кафедри аеронавігаційних систем, Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Освіта: Київський інститут інженерів цивільної авіації, Київ, Україна (1967). Напрямок наукової діяльності: зв'язок, навігація, спостереження за повітряним рухом, ефективність соціотехнічних систем. Кількість публікацій: 400. E-mail: kharch@nau.edu.ua

Барабанов Юрій Миколайович (1951). Кандидат технічних наук. Доцент. Кафедра аеронавігаційних систем, Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Освіта: Київське вище інженерно-авіаційне військове училище Військово-Повітряних сил, Київ, Україна (1973). Напрямок наукової діяльності: комп'ютерне моделювання антен, бездротові і супутникові мережі зв'язку, телекомунікації, ADS-B системи. Кількість публікацій: 50. Email: brbnv@i.ua

Грехов Андрій Михайлович (1951). Доктор фізико-математичних наук. Професор. Кафедра аеронавігаційних систем, Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Освіта: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна (1973). Напрямок наукової діяльності: спостереження, ADS-B системи, телекомунікації, комп'ютерне моделювання. Кількість публікацій: 150. Email: grekhovam@ukr.net

Терещенко Дмитро Іванович (1987). Аспірант. Кафедра аеронавігаційних систем, Національний авіаційний університет, Київ, Україна. Освіта: Національний авіаційний університет, Київ, Україна (2011). Напрямок наукової діяльності: комп'ютерне моделювання антен, бездротові і супутникові мережі зв'язку, ADS-B системи. Кількість публікацій: 8. Email: tedmiv@gmail.com

V. Kharchenko¹, Yu. Barabanov², A. Grekhov³, D. Tereshchenko⁴. Research of descriptions of collinear aerial receiving system ADS-B by numeral methods

National Aviation University, Kosmonavta Komarova avenue 1, Kyiv, Ukraine, 03680

E-mails: ¹ans@nau.edu.ua; ²brbnv@i.ua; ³grekhovam@ukr.net; ⁴tedmiv@gmail.com

Calculations of electric field intensity and directional diagrammes for colinear antennas using a method of moments in the framework of two program complexes are carried out. Comparison has shown high level of results coincidence. The sample of the antenna which is used in operating system for reception of ADS-B signals from airborne transponders is constructed.

Keywords: collinear antenna; intensity of the electric field; method of moments; radiation pattern; surveillance over air traffic; system for reception of ADS-B signals; system of integral equations.

Kharchenko Volodymyr (1946). Doctor of Engineering. Professor. Holder of a State Award in Science and Engineering of Ukraine. Winner of a State Prize of Ukraine in Science and Engineering. Vice-Rector for Scientific-Research Work, National Aviation University, Kyiv, Ukraine. Head of the Department of Air Navigation Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine. Education: Kyiv Civil Aviation Engineers, Kyiv, Ukraine (1967). Research area: communication, navigation, surveillance, effectiveness of sociotechnical systems. Publication: 400. E-mail: kharch@nau.edu.ua

Barabanov Yuri (1951). Candidate of Engineering (1996). Associate Professor.
Department of Air Navigation Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.
Education: Higher Military Engineering Aviation Academy, Kyiv, Ukraine (1973).
Research area: computer modeling of antennas, wireless and satellite communications networks, telecommunications, ADS-B systems.

Publications: 50.
Email: brbnv@i.ua

Grekhov Andrii (1951). Doctor of Physics and Mathematics (1990). Professor (1991).
Department of Air Navigation Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.
Education: Kyiv State T. Shevchenko, Kyiv, Ukraine (1990).

Research area: surveillance, ADS-B systems, telecommunications, computer modeling.
Publications: 150.
Email: grekhovam@ukr.net

Tereshchenko Dmytro (1987). Postgraduate student.

Department of Air Navigation Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.
Education: National Aviation University, Kyiv, Ukraine (2011).

Research area: computer modeling of antennas, wireless and satellite communications networks, ADS-B systems.
Publications: 8.
E-mail: tedmiv@gmail.com

В.П.Харченко¹, Ю.Н.Барабанов², А.М.Грехов³, Д.И.Терещенко⁴. Исследование характеристик коллинеарной антенны приёмной системы ADS-B численными методами

Національний авіаційний університет, просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680

E-mails: ¹ans@nau.edu.ua; ²brbnv@i.ua; ³grekhovam@ukr.net; ⁴tedmiv@gmail.com

Проведены расчеты напряженности электрического поля и диаграмм направленности коллинеарных антенн на основе метода моментов с использованием двух программных комплексов. После сравнения отмечен высокий уровень совпадения результатов. Построен образец антенны, которая используется в действующей системе для приема ADS-B сигналов бортовых ответчиков самолетов.

Ключевые слова: диаграмма направленности; коллинеарная антенна; метод моментов; наблюдение за воздушным движением; напряженность электрического поля; система интегральных уравнений; система для приема ADS-B сигналов.

Харченко Владимир Петрович (1946). Доктор технических наук. Профессор.

Заслуженный деятель науки и техники Украины. Лауреат Государственной премии Украины.

Проректор по научной работе, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Заведующий кафедрой аэронавигационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Киевский институт инженеров гражданской авиации, Киев, Украина (1967).

Направление научной деятельности: связь, навигация, наблюдение за воздушным движением, эффективность социотехнических систем.

Количество публикаций: 400.

E-mail: kharch@nau.edu.ua

Барабанов Юрий Николаевич (1951). Кандидат технических наук. Доцент.

Кафедра аэронавигационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина

Образование: Киевское высшее инженерно-авиационное военное училище Военно-Воздушных Сил, Киев, Украина (1973).

Направление научной деятельности: компьютерное моделирование антенн, беспроводные и спутниковые сети связи, телекоммуникации, ADS-B системы.

Количество публикаций: 50.

E-mail: brbnv@i.ua

Грехов Андрей Михайлович (1951). Доктор физико-математических наук. Профессор.

Кафедра аэронавигационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина (1973).

Направление научной деятельности: наблюдение за воздушным движением, ADS-B системы, телекоммуникации, компьютерное моделирование.

Количество публикаций: 150.

E-mail: grekhovam@ukr.net

Терещенко Дмитрий Иванович (1987). Аспирант.

Кафедра аэронавигационных систем, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Национальный авиационный университет, Киев, Украина (2011).

Направление научной деятельности: компьютерное моделирование антенн, беспроводные и спутниковые сети связи, ADS-B системы.

Количество публикаций: 8.

E-mail: tedmiv@gmail.com