

УДК 621.396.677.55

Я.О. Белевщук, С.В. Кукобко, О.І. Сухаревський

Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил, Харків

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРОМІНЮВАННЯ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ 9С35М1

Запропоновано метод електродинамічного розрахунку характеристик випромінювання двохдзеркальної антенної системи (типу антенної системи Касегрена) радіолокаційної станції самохідної вогневої установки 9А310М1. Розроблений метод розрахунку базується на основі методу фізичної оптики. Метод враховує наявність поверхні, що підлягає.

двохдзеркальна антенна система, характеристики випромінювання

Постановка проблеми та аналіз літератури

На сучасному етапі розвитку Повітряних Сил України, у зв'язку з тим, що більшість наявного озброєння та техніки експлуатується поза строком визначених термінів (ресурсів), достатньо гостро постає проблема використання їх залишкового ресурсу. В таких умовах використання ресурсу для проведення занять з бойовими обслугами є невиправданим. Таким чином існує нагальна необхідність в розробці тренажерно-імітаційних комплексів, зокрема для зенітних ракетних комплексів (ЗРК) С-200В, С-300П (ПТ, ПС), С-300В та «БукМ1» які знаходяться на озброєнні Повітряних Сил.

Однією з складових частин розробки тренажерно-імітаційних комплексів є визначення характеристик випромінювання антенних систем радіолокаційних засобів, які є складовими частинами вказаних ЗРК.

В даній роботі зупинимось на визначенні характеристик випромінювання антенної системи радіолокаційної станції (РЛС) 9С35М1 самохідної вогневої установки (СВУ) 9А310М1 ЗРК «БукМ1».

Проведення натурних експериментів з визначення характеристик випромінювання такої достатньо великої антенної системи потребує наявності відповідного радіолокаційного полігону та обладнання, що є дорогостоячим.

В той же час використання зменшених моделей випромінюючих систем не завжди дозволяють отримати адекватні результати [1, 2]. Таким чином, розрахункові методи отримання характеристик випромінювання в багатьох випадках мають першочергове значення [3, 4], а враховуючи що розміри антенної системи РЛС 9С35М1, набагато більші робочої довжини хвилі [5], для розрахунку її характеристик випромінювання є виправданим застосування метода фізичної оптики [3].

Мета статті – розробка електродинамічного методу розрахунку характеристик випромінювання антенної системи РЛС 9С35М1.

Основний матеріал

Радіолокаційна станція 9С35М1 призначена для роботи в складі СВУ 9А310М1 та забезпечує: виявлення, захоплення та автоматичний супровід по азимуту, куту місця, швидкості та дальності цілей; підсвічування цілей, що супроводжуються сигналом безперервного випромінювання для забезпечення роботи голівки самонаведення; передачу на ракету по каналу підсвічування сигналів керування в режимі радіокорекції [5].

Загальна побудова антенної системи РЛС 9С35М1. Антена РЛС 9С35М1 представляє собою оптичну двохдзеркальну систему Касегрена з винесеним фокусом та поворотом площини поляризації (рис. 1).

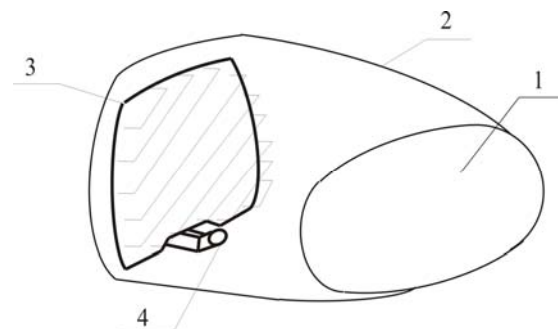


Рис. 1. Антенна система РЛС 9С35М1

Антенна складається з:

а) параболического дзеркала (1) з винесеним фокусом, яка утворена решіткою паралельних горизонтальних провідників, що розташовані на внутрішній стороні діелектричної основи (2), яка одночасно є захисним ковпаком;

б) поляризаційного рефлектора (3), який здійснює поворот площин поляризації сигналів каналу ОГЛЯДУ, ПІДСВІЧУВАННЯ, ЗАПИТУВАЧА та компенсаційних антен;

в) рупорного опромінювача (4) каналів ОГЛЯДУ та ПІДСВІЧУВАННЯ, який має на прийом три вихідних канали сумарний, різністний азимутальний та різністний кута місця.

Функціонування антенної системи. Кожна зі складових частин антени виконує наступні функції:

– опромінювачі – формують необхідні амплітудно-фазові розподіли горизонтально поляризованого електромагнітного поля по розкриттю параболічного дзеркала антени;

– параболічне решітчасте дзеркало – формує пласку електромагнітну хвилю горизонтальної поляризації, напрямком розповсюдження якої паралельний оптичній вісі параболи та спрямований у бік рефлектора;

– поляризаційний рефлектор – змінює напрямком розповсюдження пласкої електромагнітної хвилі (виконує функції дзеркального відбивача) та, одночасно, змінює площину поляризації на вертикальну.

Відбита від рефлектора вертикально поляризована хвиля безперешкодно проходить крізь параболічне дзеркало (горизонтально розташовані провідники), яке є радіопрозорим для хвиль вертикальної поляризації, та формує в просторі необхідну діаграму спрямованості.

Керування положенням рефлектора забезпечується електромеханічною частиною антенно-хвильовідної системи.

Геометрія задачі та основні розрахункові співвідношення. При проведенні розрахунків випромінювання антенної системи будемо розглядати антенну систему, яка наведена на рис. 2 (для спрощення розрахунків не будемо враховувати вплив радіопрозорого захисного ковпака).

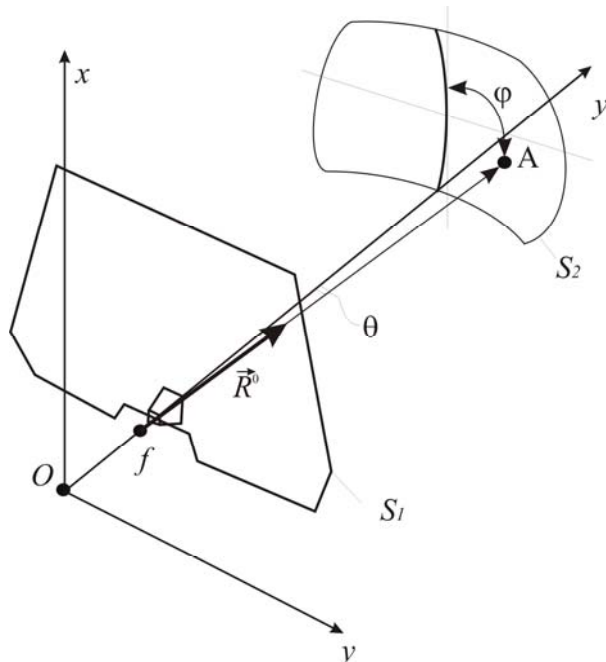


Рис. 2. Геометрія задачі

На рис. 2 S_1 – поляризаційний рефлектор, S_2 – параболічне дзеркало представимо у вигляді суцільного (при цьому необхідно відмітити, що поляризаційний ефект (поворот площини поляризації

при відбитті електромагнітної хвилі) враховується автоматично, тобто при розрахунках не враховуються лише енергетичні втрати, при проходженні електромагнітної хвилі крізь параболічне решітчасте дзеркало). Система координат обрана таким чином, що площина xOy співпадає з привалочною площиною антенної системи.

Поле, що розсіюється рефлектором може бути записане як:

$$\vec{H}^{роз}(\vec{r}_0) = jk_0 \frac{e^{jk_0|\vec{x}_0|}}{4\pi|\vec{x}_0|} \int_{S_1} \vec{H}^\perp e^{-jk_0(\vec{r}_0 \cdot \vec{x}_0)} dS, \quad (1)$$

де k_0 – хвильове число вільного простору; \vec{r}_0 – напрямком на точку в дальній зоні; $\vec{H}^\perp \approx 2(\vec{n} \times \vec{H}^0)$;

$|\vec{x}_0|$ – відстань до точки в дальній зоні; \vec{n} – нормаль до поверхні S_1 ;

\vec{H}^0 – поле, що наведене на поверхні S_1 параболічним дзеркалом S_2 .

Для визначення поля \vec{H}^0 перш за все необхідно визначити поле \vec{H}^1 , яке наводиться на параболічному дзеркалі S_2 рупорним опромінювачем. У відповідності з [6] поле рупорного опромінювача може бути записане як:

$$\begin{cases} \vec{E}^1(\vec{x}) = \frac{jk_0}{4\pi} \vec{p}' \frac{\exp[jk_0|\vec{x} + \vec{\rho}|]}{|\vec{x} + \vec{\rho}|} F(\theta, \varphi), \\ \vec{H}^1(\vec{x}) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{jk_0}{4\pi} (\vec{R}^0 \times \vec{p}') \frac{\exp[jk_0|\vec{x} + \vec{\rho}|]}{|\vec{x} + \vec{\rho}|} F(\theta, \varphi), \end{cases} \quad (2)$$

де $\vec{R}^0 = \frac{\vec{x} + \vec{\rho}}{|\vec{x} + \vec{\rho}|}$ – одиничний вектор, який спрямований вздовж променя, що падає з фокуса f в точку A на поверхні дзеркала; $\vec{\rho}$ – радіус-вектор, який спрямований вздовж оптичної вісі опромінювача; θ – кут, який характеризує спрямованість вектору \vec{R}^0 відносно оптичної вісі опромінювача; φ – кут, що характеризує положення точки A відносно площини xOz ;

$\vec{p}' = \frac{\vec{R}^0 \times (\vec{p}^0 \times \vec{R}^0)}{|\vec{R}^0 \times (\vec{p}^0 \times \vec{R}^0)|}$ – характеризує поляризацію хвилі, яка падає у напрямку \vec{R}^0 (\vec{p}^0 – одиничний вектор, який характеризує поляризацію опромінювача); \vec{x} – радіус-вектор точки на дзеркалі.

Функція $F(\theta, \varphi)$ визначає залежність амплітуди та фази поля опромінювача в дальній зоні від кутових координат θ, φ [5]:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\pi}{4}$$

$$\times \left[\frac{\sin\left(\psi_H - \frac{\pi}{2}\right)}{\left(\psi_H - \frac{\pi}{2}\right)} + \frac{\sin\left(\psi_H + \frac{\pi}{2}\right)}{\left(\psi_H + \frac{\pi}{2}\right)} \right] \frac{\sin \psi_E}{\psi_E}, \quad (3)$$

де $\psi_E = \frac{L_E \pi}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi$; $\psi_H = \frac{L_H \pi}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi$; L_E ,

L_H – розміри рупору в площинах E та H відповідно.

Надалі визначимо поле, що наводиться параболічним дзеркалом S_2 на рефлекторі S_1 . Воно може бути записане як:

$$\vec{H}^0(\vec{x}_0) = \frac{2}{4\pi} \int_{S_2} \frac{e^{jk_0 r}}{r} \frac{jk_0 r - 1}{r} \left((\vec{n} \times \vec{H}^1) \times \vec{r}^0 \right) dS, \quad (4)$$

де $r = |\vec{x} - \vec{x}_0|$, $\vec{x}_0 \in S_1$, \vec{r}^0 – напрямок на точку спостереження.

Надалі, визначивши \vec{H}^1 та підставивши його до виразу (1) можемо визначити поле, яке випромінюється антенною системою в дальню зону.

Для врахування впливу поверхні яка підлягає скористаємось наступним виразом, що наведений в [7]:

$$\begin{aligned} \vec{p} \vec{E}(\vec{R}^0) &= -j\Omega(k_0 x_0) k_0^2 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \times \\ &\times \int_{S_1} \left[\begin{aligned} &\vec{p} e^{-jk_0(\vec{R}^0 \vec{x})} + \\ &+ \vec{p}^1 e^{-jk_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \vec{c} + \vec{R}^1 \vec{x})} \end{aligned} \right] \vec{H}^1(\vec{x}) dS, \end{aligned} \quad (5)$$

де вектор \vec{c} характеризує фазове запізнення, яке виникає за наявності поверхні, що підлягає;

$$-\vec{R}^1 = -\vec{R}^0 + 2\vec{n}(\vec{R}^0 \vec{n}) -$$

напрямок відбитої від площини що підлягає хвилі;

$$\Omega(k_0 x_0) = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(jk_0 x_0)}{k_0 x_0};$$

\vec{p}^1 – комплексний коефіцієнт відбиття,

$$\vec{p}^1 = \vec{p}_T^1 - \vec{n} \frac{(\vec{p}_T^1 \vec{R}^1)}{\cos \theta};$$

де

$$\vec{p}_T^1 = \frac{(s \cos \theta - 1)}{(s \cos \theta + 1)} + \frac{2s}{s \cos \theta + 1} \left[\begin{aligned} &\vec{R}_T^1 \frac{(\vec{R}_T^1 \vec{p}_0)}{s + \cos \theta} + \\ &+ \vec{R}_\perp^1 \frac{\vec{R}_\perp^1 \vec{p}^0}{\epsilon'_1 \mu'_1 \left(s + \frac{\cos^2 \theta_1}{\cos \theta_1} \right)} \end{aligned} \right];$$

$$s = \sqrt{\frac{\mu'_1}{\epsilon'_1}} \cos \theta_1; \cos^2 \theta_1 = 1 - \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon'_1 \mu'_1}; \vec{R}_T^1 = \vec{R}^1 - \vec{n}(\vec{R}^1 \vec{n});$$

$$\vec{R}_\perp^1 = (\vec{n} \times \vec{R}^1); \vec{p}_T^0 = \vec{p}^0 - \vec{n}(\vec{p}^0 \vec{n}).$$

Результати розрахунків характеристик випромінювання моделі антенної системи РЛС 9С35М1. На рис. 3 наведені результати розрахунків розподілу щільностей струмів на поверхнях плаского рефлектора S_1 та параболічного дзеркала S_2 (наведені на рисунках розміри вказані в робочих довжинах хвиль каналу ПДСВІЧУВАННЯ, $\lambda_0 = 0,4$ м [8]).

Параметри параболічного дзеркала підбирались з апроксимацією методом найменших квадратів за 12 замірам.

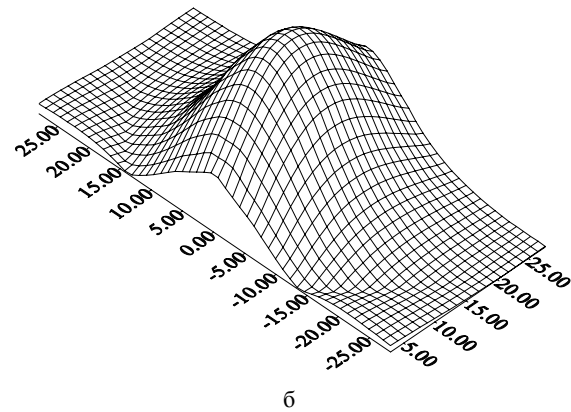
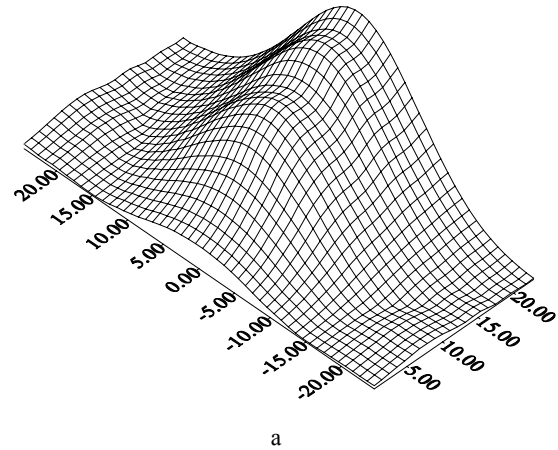


Рис. 3. Розподіл щільностей струму на поверхні:
а – плаского рефлектора S_1 ;
б – параболічного дзеркала S_2

На рис. 4 представлені результати розрахунків діаграм спрямованостей (ДС) антенної системи РЛС 9С35М1 в кутомісцевій площині в режимі підсвічування цілі: (а) – при скануванні під кутом 0° до поверхні, що підлягає; (б) – при скануванні під кутом 20° . При розрахунках електричні параметри поверхні, що підлягає були вибрані відповідними до електричних параметрів сухого суглинку – $\epsilon'_1 = 3,0 + j0,4$.

Для отримання більш детальних висновків про вплив поверхні яка підлягає на поведінку ДС поблизу головного максимуму були проведені розрахунки

ДС при скануванні під кутом 10° до поверхні, що підлягає.

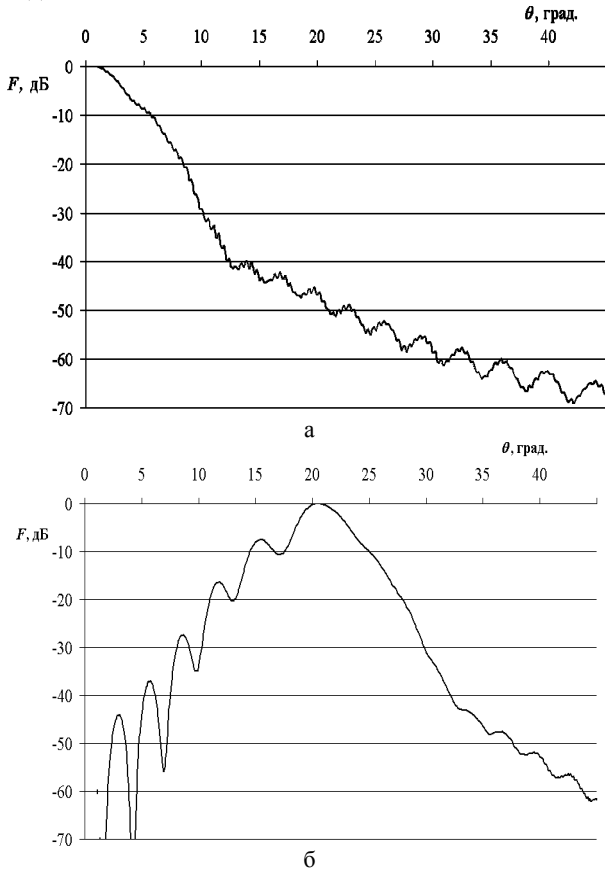


Рис. 4. Діаграми спрямованості антенної системи РЛС 9С35М1 в кутомісцевій площині в режимі підсвічування цілі: а – при скануванні під кутом 0° до поверхні, що підлягає; б – при скануванні під кутом 20° до поверхні, що підлягає

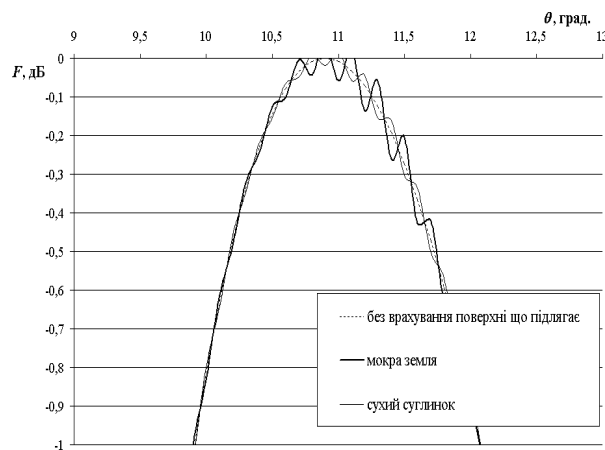


Рис. 5. Діаграма спрямованості антенної системи РЛС 9С35М1 в кутомісцевій площині в режимі підсвічування цілі – при скануванні під кутом 10° до поверхні, що підлягає

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що наявність поверхні яка підлягає призводить до уходу максимуму головної пелюстки діаграми спрямованості (на $\pm 0,1^\circ \dots 0,7^\circ$), та до незначних флуктуацій поля в головній пелюстці ДС

(рис. 5; електричні параметри мокрої землі – $\epsilon'_1 = 30 + j0,6$), що може привести до виникнення похибок пеленгу при роботі радіолокаційної головки самонаведення зенітної керованої ракети по сигналу, який відбито від великорозмірної аеродинамічної цілі [9 – 11].

Висновок

У роботі запропоновано електродинамічний метод розрахунку характеристик випромінювання антенної системи РЛС 5С35М1, який може бути використано при розробці тренажерно-імітаційного комплексу СВУ 9А310М1.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що наявність поверхні яка підлягає призводить до уходу максимуму головної пелюстки, та до флуктуацій поля в ній. Наявність флуктуацій потребує додаткового вивчення, оскільки вони можуть привести до похибок пеленгу при роботі радіолокаційної головки самонаведення зенітної керованої ракети

Список літератури

1. Казарин А.Н., Кравченко И.Т., Ключников А.С. Методы расчета и измерения характеристик и параметров антенн. – Минск: БГУ, 1971. – 142 с.
2. Мицмакер М.Ю., Торгованов В.А. Безэховые камеры СВЧ. - М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.
3. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Миттры. – М.: Мир, 1977. – 485 с.
4. Хенл Х., Мауэ А., Вестпфаль К. Теория дифракции. – М.: Мир, 1964. – 428 с.
5. Изделие 9А310М1. Техническое описание. ГС 1.641.006 ТО. – 1985. – 324 с.
6. Бахрах А.Д., Галимов Г.К. Зеркальные сканирующие антенны. – М.: Наука, 1981. – 302 с.
7. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Ю.К. Сиренко, И.В. Сухаревский, О.И. Сухаревский, Н.П. Яшина; под ред. Ю.К. Сиренко. – Х.: Крок, 2000 – 344 с.
8. Войсковой зенитный ракетный комплекс "Бук". Часть первая. – М.: Воениздат, 1986. – 320 с.
9. Акопян И.Г., Вексин С.И., Медведев Г.П., Сухов А.М. Особенности построения и развития техники радиолокационных головок самонаведения в системах ракетного вооружения ВВС и ПВО // Радиотехника. – 2005. – № 2. – С. 30-39.
10. Бархударян Н.В., Важинский С.Э., Василец В.А., Сазонов А.З., Сухаревский О.И. Математическое моделирование процесса пеленгации в ближней зоне сложного протяженного объекта // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 2. – С. 217-223.
11. Isby D.C. US Air Force are evaluating characteristics of new modernization of Raytheons AIM - 120 AMRAAM // Jane's, Missiles & rockets. – 2004. – Vol. 8, № 1. – P. 79-83.

Надійшла до редколегії 5.02.2007

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співр. В.К. Іванов, інститут радіофізики та радіоелектроніки НАНУ, Харків.