

В.А. Кирилюк, к.т.н., с.н.с.
Г.П. Чернявський, к.військ.н., доц.
Ю.І. Міхєєв, к.т.н.
О.І. Пінчук, с.н.с.

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова

НАДШИРОКОСМУГОВА АНТЕННА СИСТЕМА ДЛЯ МОБІЛЬНОГО ПЕЛЕНГАТОРА РАДІОТЕЛЕВІЗІЙНИХ СТАНЦІЙ

Розглянуто завдання розроблення та виготовлення дослідного зразка надширокосмугового антенного елемента та антенної системи (АС) на базі такого елемента для мобільного пеленгатора джерел радіотелевізійних сигналів з використанням квазідоплерівського методу пеленгації. За результатами досліджень запропоновано технічне рішення – мобільна надширокосмугова антенна система, елементами якої є нові надширокосмугові випромінювачі, які можна віднести до класу диско-конусних антен та експоненціальних антен. Надширокосмуговість випромінювача забезпечується формою фольгованої частини антенного елемента. Обвідна функція елемента АС, отримана теоретичним моделюванням та підтверджена практичним експериментом, має вигляд експоненти. Забезпечення необхідної точності апроксимації досягнуто вибором полінома п'ятого ступеня. Посадження елементів випромінювача, їхнє центрування та спаявання здійснюють за допомогою спеціально розробленого оснащення. Перевірку параметрів випромінювача проведено вимірюванням коефіцієнта стоячої хвилі, який приймає значення менше 3 у діапазоні частот від 95 до 900 МГц, що задовольняє вимогам, які висувають до надширокосмугової АС пеленгатора джерел радіотелевізійних сигналів. Наведено основні параметри, та конструктивні особливості АС.

Ключові слова: антенна система; елемент антенної системи; пеленгатор; метод пеленгації; надширокосмуговий.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Аналіз застосування засобів масової інформації в інформаційних конфліктах показав, що на сьогоднішній день телебачення та радіомовлення є найбільш масштабним та оперативним щодо отримання, обробки та оприлюднення інформації. Вони доступні більш ніж 90 % населення країни, що ставить їх у ранг пріоритетних об'єктів, здатних суттєво впливати на свідомість соціальних об'єктів. Актуальність вирішення завдань пеленгації, у тому числі джерел несанкціонованого випромінювання, у даний час набуває все більшої значущості. Одним з важливих науково-технічних напрямків є розробка мобільних пеленгаційних систем у діапазоні хвиль від 80 до 1000 МГц. Складність створення таких систем полягає в тому, що вимоги до них є досить суперечливими. Так потрібно забезпечити: умови для роботи в широкому діапазоні частот, досить вузьку діаграму спрямованості (ДС) АС в азимутальній площині, чутливість радіопеленгатора і, найголовніше, малі габаритні розміри для можливості встановлення на даху рухомого об'єкта (автомобіль). Крім того, слід забезпечити роботу без розгортання АС як на місці, так і в процесі руху об'єкта.

Як відомо, електромагнітне поле описують амплітудними, фазовими і поляризаційними характеристиками. Причому для далекої зони джерело радіовипромінювання можна вважати точковим, що формує сферичний фронт електромагнітної хвилі. Однак у межах аналізованого простору (за відсутності перевідбиття сигналів) фронт електромагнітної хвилі можна вважати локально плоским, фаза хвилі змінюється за лінійним законом, амплітуду хвилі можна вважати сталою. Це обумовлює можливість визначення напрямку на джерело випромінювання на основі аналізу інформації про фазу електромагнітної хвилі (за напрямком максимальної швидкості зміни фази з урахуванням знака). Цей принцип використовують усі відомі фазові і частотні (доплерівські та квазідоплерівські) методи пеленгування [1–5]. Різниця між методами пеленгування полягає лише в способі перетворення фазових залежностей електромагнітного поля у вихідний низькочастотний або цифровий сигнал, а також у складності забезпечення неспотвореної передачі цього сигналу на пристрій визначення пеленга.

Розширення робочого діапазону частот будь-якого пеленгатора в область низьких частот можливе за рахунок відповідного збільшення займаної АС площі, проте практично це не завжди можливо. Наприклад, АС мобільного пеленгатора може мати максимальний габарит не більше 1–1,5 м, що в короткохвильовому діапазоні значно знижує точність визначення різниці фаз на антенних елементах.

Проблема полягає в створенні та обґрунтуванні технічного рішення надширокосмугової (частотно-незалежної) АС мобільного пеленгатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз технічних характеристик існуючих пеленгаторів, досліджених у відкритих джерелах, свідчить про те, що більшість з них мають широкі можливості щодо

пошуку координат джерел радіовипромінювань (ДРВ) у радіотелевізійному просторі. У публікаціях розглянуто архітектуру побудови таких систем, однак недостатньо розкрито питання щодо виготовлення надширококугової АС, зокрема щодо вирішення завдань радіопеленгації джерел випромінювань радіотелевізійних сигналів різної поляризації в діапазонах частот від 80 МГц до 1 ГГц [6–8]. Основну зацікавленість викликають мобільні станції радіоконтролю, які здебільшого виготовлені зарубіжними виробниками. Аналіз конструктивних особливостей АС існуючих мобільних пеленгаторів свідчить про низку суттєвих недоліків, а саме: великі масо-габаритні розміри АС; технічні труднощі монтажу, налаштування, юстирування АС пеленгатора в мобільному варіанті; в окремих варіантах необхідність розробки та створення опорно-поворотного приводу АС у ручному або автоматизованому режимах.

Як елементи АС пеленгатора застосовують диско-конусні та споріднені їм біконічні антени, які мають надзвичайно широку смугу робочих частот і належать до класу надширококугових антен. Основні типи та зовнішній вигляд таких диско-конусних антен наведено на рисунку 1 [1-4, 6-10].

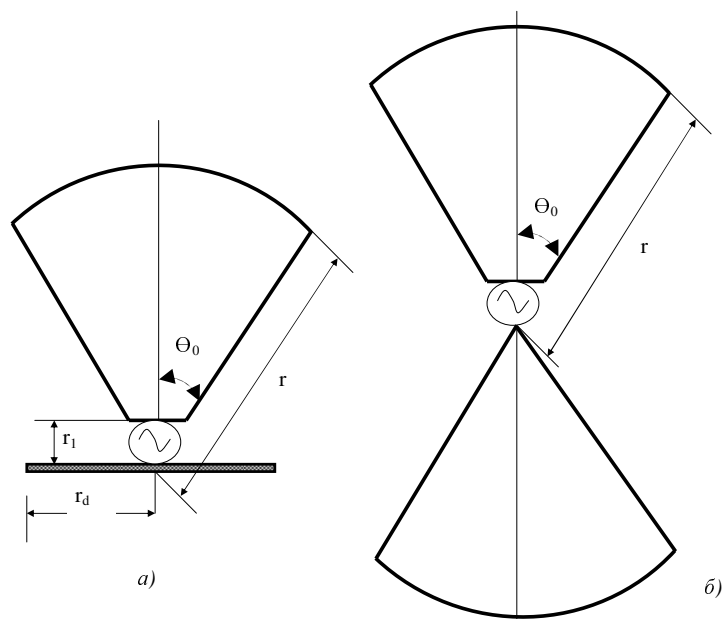


Рис. 1. Зовнішній вигляд антен у перерізі: а) диско-конусної; б) біконічної

Диско-конусна антена (рис. 1, а) є насправді біконічною антеною (рис. 1, б), де один з конусів замінюється диском, який виконує функцію «землі». Надширококуговість та ДС такого типу випромінювачів визначається, в основному, конструкцією (r_d , r , r , θ_0), конструктивними особливостями узгодження випромінювача з фідером живлення.

Основна технологія створення таких антен полягає в тому, що конус виготовляють у вигляді рупора з листа міді або якого-небудь іншого матеріалу, який легко паяти. Кабель живлення прокладають усередині конуса та його зовнішнє обплетення припаюють до конуса, а очищений відрізок внутрішнього провідника – до металевого диска. Диск утримується в горизонтальному положенні за допомогою ізолюючих підпірок.

Конструктивні особливості (у першу чергу, габаритні розміри), ДС, необхідний діапазон частот для пеленгування радіотелевізійних сигналів не дозволяють використовувати розглянуті антени як елементи АС мобільного пеленгатора. Отже, на теперішній час **невирішеною раніше частиною проблеми** вдосконалення квазідоплерівського методу пеленгації є завдання розроблення АС, яка б могла задовольняти вимоги, що висувають до мобільних систем пеленгування радіотелевізійних станцій.

Формулювання мети статті. Обґрунтування варіанта надширококугового антенного елемента, його розрахунок, розроблення, виготовлення дослідного зразка, а також розроблення АС з n елементів для мобільного пеленгатора джерел радіотелевізійних сигналів з використанням квазідоплерівського методу пеленгації.

Викладення основного матеріалу. Основним призначенням засобів радіомоніторингу є постійний або періодичний контроль завантаження ефіру в широкому діапазоні частот, виявлення та аналіз нових випромінювань, визначення місцеположення їх джерел, їх оцінювання, виявлення загроз та непередбачених або спеціально організованих радіоканалів витоку інформації. Кожне з цих завдань

багатоетапне, вирішується в умовах складної електромагнітної обстановки та потребує використання широкої номенклатури радіотехнічних засобів, що виконують окремі функції.

Для вирішення завдання визначення пеленга радіотелевізійних випромінювань доцільно реалізувати спосіб електричного сканування n елементів антенної решітки, розміщених по колу на однакових відстанях один від одного та від центра. Конструкційно-функціональну схему пеленгатора, що дозволяє реалізувати квазідоплерівський спосіб пеленгування телевізійних сигналів, наведено на рисунку 2. Елементи АС (1–4), розміщені по колу, підключаються лише по одному в певний інтервал часу відповідно до заданої частоти комутації. Шляхом задавання порядку та частоти комутації антен телевізійний сигнал модулюється частотою Доплера. Модульований сигнал надходить у приймач блока управління та обробки даних для перенесення в аудіодіапазон з метою подальшої обробки.

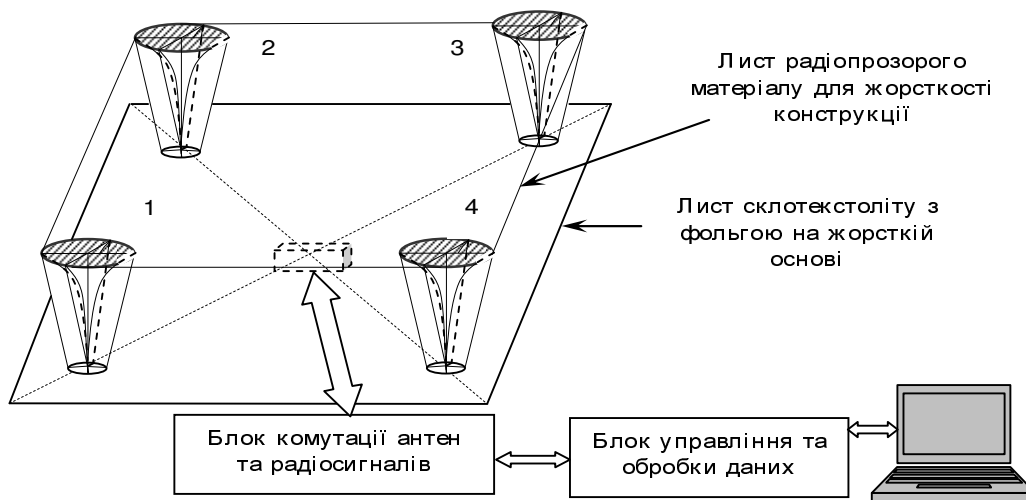


Рис. 2. Конструкційно-функціональна схема пеленгатора

Функцію «землі» виконує лист склотекстоліту з фольгою на жорсткій основі, на якому розміщують елементи АС. Ця конструктивна особливість надає змогу розташовувати АС на даху транспортних засобів та забезпечує її жорсткість.

Завдання збудження фідером елементів АС, схеми блоків комутації антен та радіосигналів, управління та обробки даних, програмного забезпечення в статті не розглядаються.

Кількість елементів АС повинна бути кратною 2^k та може бути теоретично 4, 8, 16. Результати експериментальних досліджень показали, що кількість елементів більше 8 не призводить до підвищення точності визначення пеленга внаслідок негативного взаємного впливу елементів.

Використання як елементів АС диско-конусної антени (рис. 1) обмежується вимогами мобільності та розміщення АС на даху транспортних засобів, що призводить до невизначеності ДС внаслідок відсутності підстильної поверхні Землі та впливу металевих даху (корпусу) транспортного засобу.

Для розрахунку надширококутового випромінювача необхідно визначити його геометричні параметри, які б відповідали заданим характеристикам: імпедансу, ДС, фазо-частотній характеристиці (ФЧХ). Розрахунок вхідних характеристик, ДС та ФЧХ випромінювача в широкій смузі частот та геометричних параметрів методом часткових областей (у програмному пакеті Ansoft HFSS v9) дозволив асимптотично визначити форму випромінювача. Вона є новою та може бути віднесена до класу диско-конусних та експоненціальних антен.

Кожен елемент АС складають з 2 або 4 елементів випромінювача, виготовлених з двостороннього фольгованого склогетинаксу.

На рисунку 3 наведено зовнішній вигляд одного з двох елементів випромінювача у фронтальній площині. Один елемент випромінювача виготовляють з листа фольгованого з обох боків склогетинаксу, який звільняють від частини мідної фольги відповідно до трафарету методом травлення. На елементі випромінювача з обох боків залишається фольгований гетинакс відносно осі ординат (oy), обмежений симетричною обвідною $f(x)$.

Досвід виготовлення елемента випромінювача показав недосконалість реалізації відповідно до зовнішнього вигляду, який наведено на рисунку 3.

Основний недолік полягає в труднощах подальшого монтажу випромінювача та забезпечення жорсткості як випромінювача, так і АС в цілому. На рисунку 4 наведено зовнішній вигляд елемента випромінювача, позбавленого цього недоліку. Елемент випромінювача виконують, як показано на

рисунку 3, але з додатковим залишенням фольгованого склогетинаксу зверху та знизу елемента. Товщину цього додаткового фольгованого склогетинаксу обирають з розрахунку забезпечення надійного з'єднання з верхнім та нижнім корпусом АС методом спаювання з двох боків. Верхня та нижня частини цього фольгованого склогетинаксу повинні збігатися з верхньою та нижньою несучими частинами АС (рис. 2). Тим самим забезпечується відсутність впливу цього додаткового фольгованого склогетинаксу на електричні характеристики випромінювача.

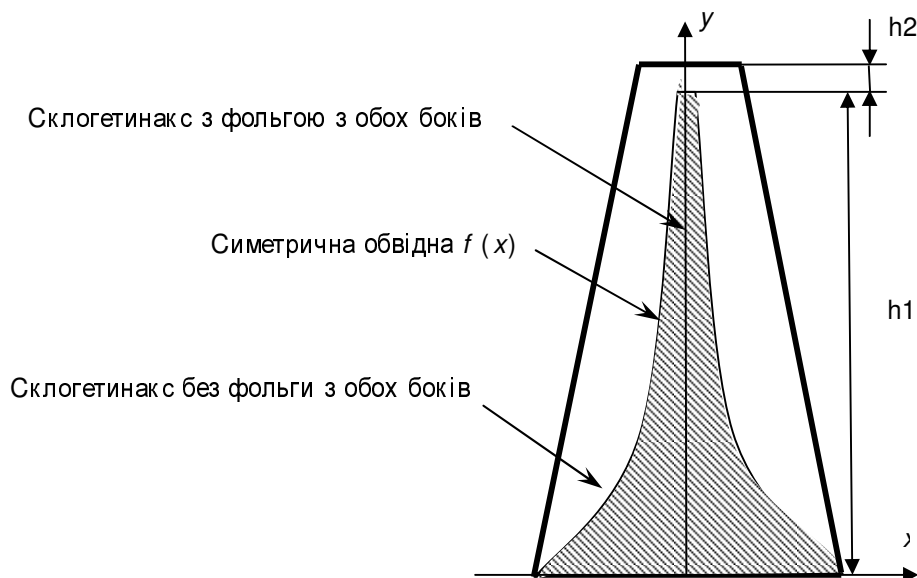


Рис. 3. Зовнішній вигляд одного з двох елементів випромінювача

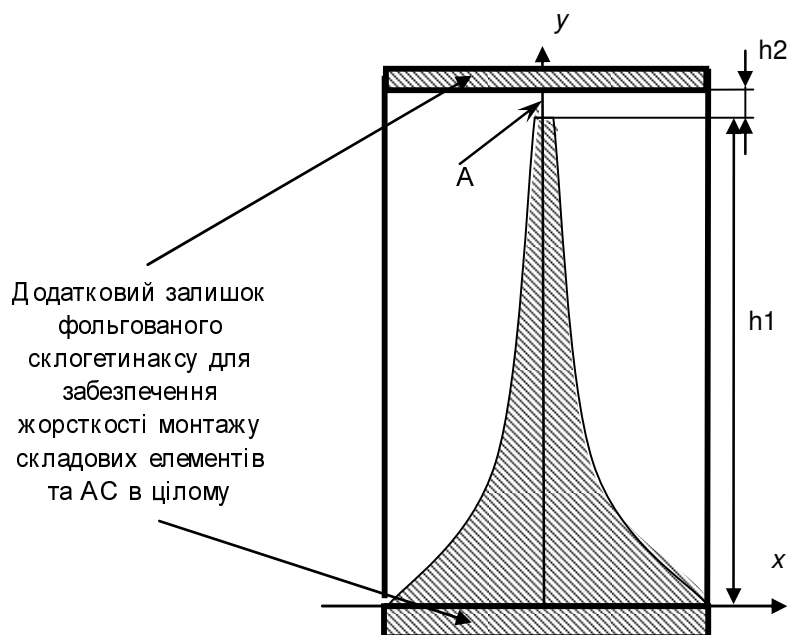


Рис. 4. Зовнішній вигляд елемента випромінювача з покращеним забезпеченням жорсткості монтажу АС

Надширокосмуговість випромінювача забезпечується формою фольгованої частини антенного елемента. Обвідна функція $f(x)$ має вигляд експоненти, вона отримана теоретичним моделюванням та підтверджена практичним експериментом.

У таблиці 1 наведено функції, що апроксимують обвідну, та відповідну їм похибку апроксимації експериментальних даних Δ .

Таблиця 1

№ з/п	Функція, що апроксимує обвідну	Похибка апроксимації Δ
1	$x = \exp(-0,154y)$	0,0665
2	$x = 0,0142y^2 - 0,6675y + 7,5$	0,0765
3	$x = 0,0015y^3 - 0,0226y^2 - 0,4641y + 7,5$	0,0086
4	$x = -0,0002y^4 + 0,0095y^3 - 0,1067y^2 - 0,2056x + 7,5$	0,0038
5	$x = 4 \cdot 10^{-5}y^5 - 0,0021y^4 + 0,0377y^3 - 0,2799y^2 - 0,1355x + 7,5$	0,0008

Аналіз таблиці показує, що забезпечення необхідної точності апроксимації досягають вибором полінома п'ятого ступеня, при цьому похибка становить менше 10^{-3} .

Виготовлення випромінювача здійснюють шляхом суміщення осей симетрій двох його елементів уздовж осі oy та у взаємно перпендикулярних площинах відносно осі ox (рис. 5, а). Конструктивно поєднання двох елементів можна здійснювати декількома способами.

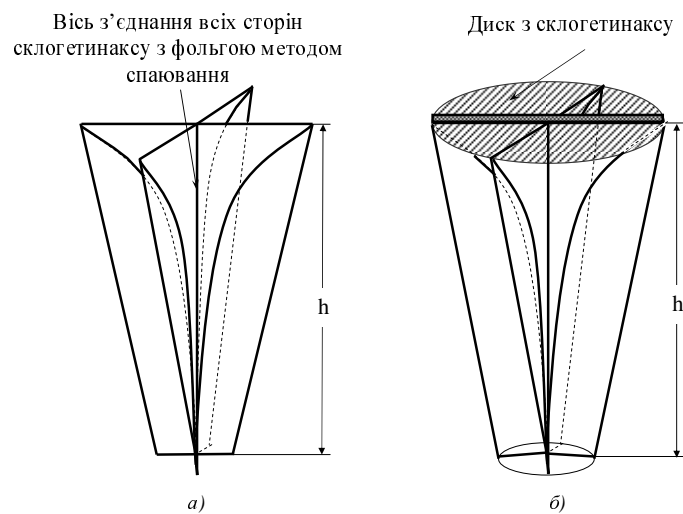


Рис. 5. Зовнішній вигляд випромінювача

Поєднання отриманих чотирьох елементів випромінювача, їх центрування та спаювання здійснюють за допомогою оснащення (рис. 6, 7).

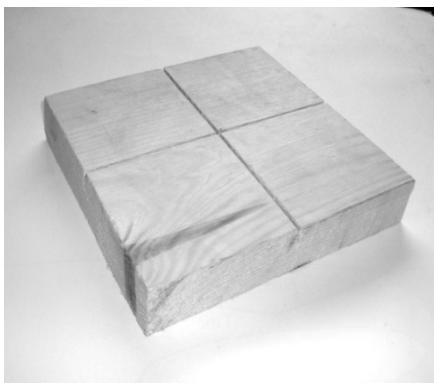


Рис. 6. Варіант нижньої частини оснащення для поєднання елементів випромінювача

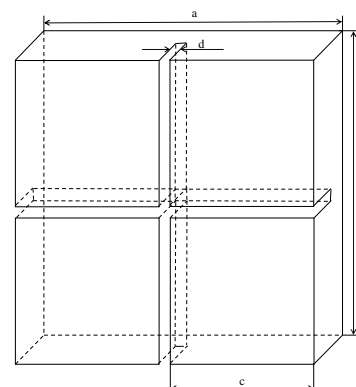


Рис. 7. Варіант оснащення для поєднання елементів випромінювача

При першому способі поєднання двох елементів здійснюють шляхом пропилювання вздовж осі oy до середини першого елемента зверху, другого – знизу з подальшим їх поєднанням та спаюванням чотирьох граней (рис. 5, а). Другий спосіб полягає в наступному. Кожен елемент розділяють по осі oy на два. Можливе виготовлення одного елемента випромінювача, як половини елемента, наведеного на рисунку 4, що дає змогу використовувати менші за розміром листи склогетинаксу. Точність виготовлення

оснащення для поєднання елементів випромінювача має суттєве значення для їх суміщення та центрування. Для наведеного варіанта оснащення були застосовані такі розміри: $a = b = 80$ мм; $c = 39$ мм; $d = 1,5$ мм. Формування випромінювача здійснюється приєднанням до основи елементів диска з склогетинаксу (рис. 5, б). Діелектричні та електричні характеристики фольгованого гетинаксу елементів випромінювача та диска повинні бути однаковими. Формують АС з чотирьох (восьми) випромінювачів, розміщених на рівновіддалених відстанях по колу діаметром D (рис. 8). Таке розташування випромінювачів забезпечує вимогу розміщення фазових центрів для їх збудження фідером.

Випромінювачі монтують на лист фольгованого склогетинаксу на жорсткій основі за схемою, наведеною на рисунку 8, а, 9, 10. На макеті (рис. 9, 10) монтаж випромінювачів виконано на струмопровідній основі, виготовленій з цинкованого заліза, що виконує роль екрана. Верхню частину випромінювача з диском монтують з діелектричного листа (рис. 2, 9, 10), що забезпечує жорсткість та радіопрозорість АС.

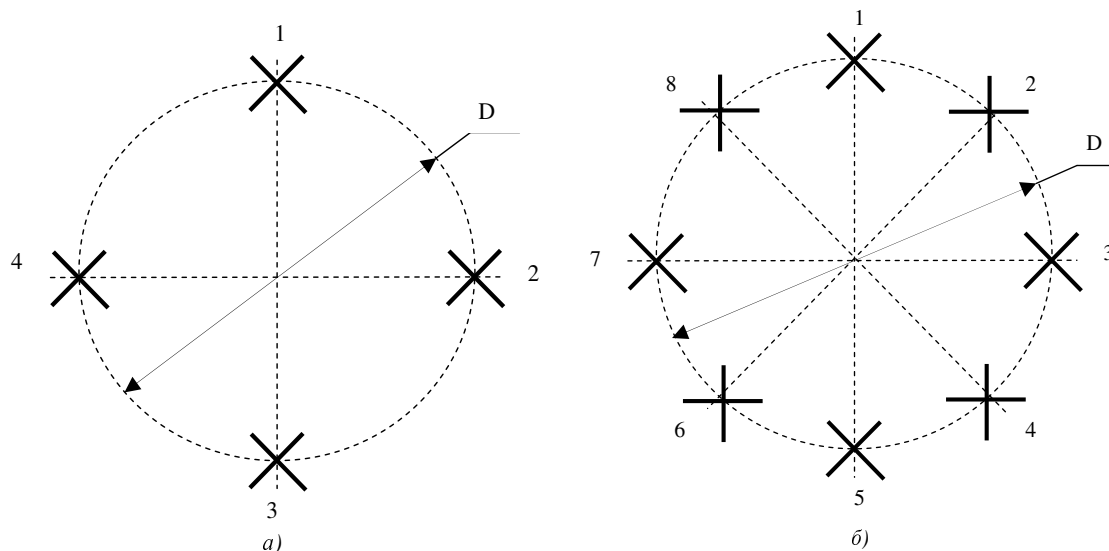


Рис. 8. Схема розміщення випромінювачів АС:
а) АС з чотирьох випромінювачів; б) АС з восьми випромінювачів



Рис. 9

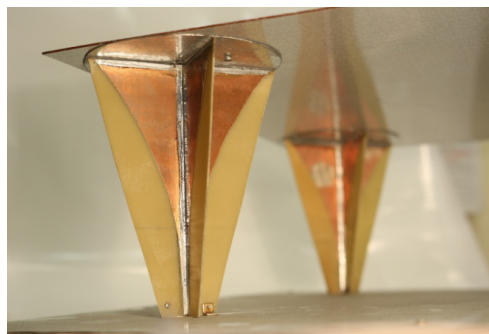


Рис. 10

Перевірку параметрів випромінювача було проведено вимірюванням коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) приладами SX-1000, SX-400. Числове значення КСХ можна використовувати як поріг критерію широкосмуговості. Частотну залежність КСХ випромінювача при узгодженні з фідером, який має стандартний хвильовий опір 50 Ом, наведено на рисунку 11.

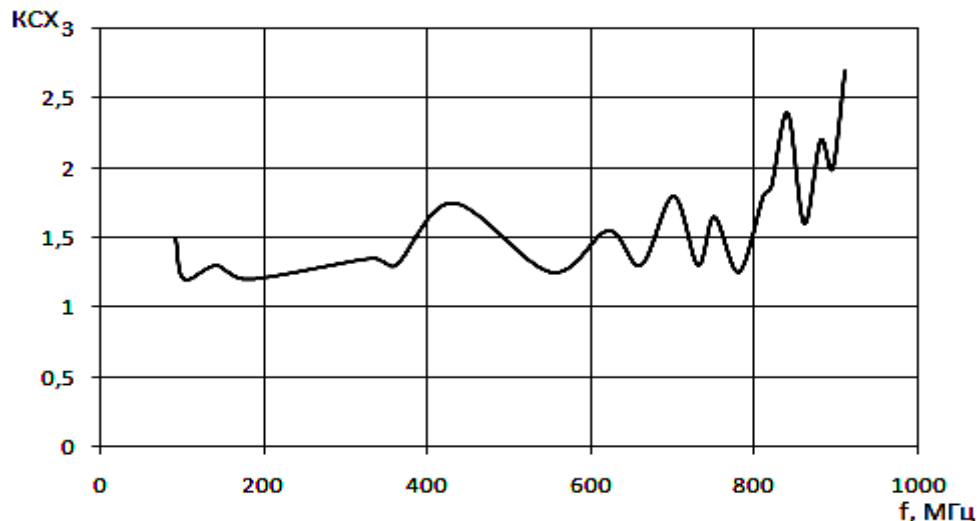


Рис. 11. Значення КСХ випромінювача за результатами вимірювань

Живлення випромінювача фідером для проведення вимірювань здійснювали шляхом з'єднання центрального провідника з фольгою випромінювача в зоні А (рис. 4), а обплетення з струмопровідною основою за місцем з'єднання випромінювача з основою (рис. 9, 10).

Аналіз значення КСХ (рис. 11) показує, що при зміні частоти від 95 до 900 МГц КСХ < 3. За межами цього діапазону КСХ досить швидко зростає до 10. Такі результати добре узгоджуються з розрахунками методом скінченних різниць у часовій області (finite-difference Time – Domain FDTD).

Висновок з даного дослідження. У статті розглянуто питання дослідження та практичної реалізації мобільної АС для пеленгації радіотелевізійних станцій. Розроблено технічне рішення АС на базі нових надширококутних випромінювачів, які можна віднести до класу диско-конусних та експоненціальних антен. Наведено основні параметри та конструктивні особливості АС.

Перспективу подальших досліджень складають: питання надширококутності опромінювача та АС на основі аналізу частотної залежності вхідного імпедансу; вирішення електродинамічного завдання збудження випромінювача як узгодженим фідером, так і кільцевими фазованими джерелами; дослідження конструктивних особливостей збудження антени фідером.

Список використаної літератури:

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихман, В.А. Козьмин ; под ред. А.М. Рембовского. – М. : Горячая линия–Телеком, 2006. – 492 с.
2. Ротхаммель К. Антенны / К.Ротхаммель. – М. : Энергия, 1979. – 512 с.
3. Sundaram K.R. Module conversion method for estimating the direction of arrival / K.R. Sundaram, R.J. Mallik //IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2000. – № 36 (4). – Pp. 1391–1396.
4. Мезин В.К. Автоматические радиопеленгаторы / В.К. Мезин. – М. : Советское радио, 1969. – 215 с.
5. Moell J.A. Good Doppler Gets Better / J.Moell // 73 Magazine. – 1995. - Pp. 68-73.
6. Jacobs E. Ambiguity resolution in interferometry / E.Jacobs, E.Ralston // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1981. - № 17 (6). – Pp. 766–780.
7. Amert A.K. Miniaturization of the biconical antenna for UWB applications / A.K. Amert, K.W. Whites //IEEE Transaction on antennas and propagation. – 2009. - № 12. – Pp. 3728-3735.
8. Kim J. Novel ultra-wideband discone antenna / J.Kim, S.Ook // Microwave And Optical Technology Letters. – 2004. – № 2. – Pp. 113-115.
9. Schantz H. The Art and Science of Ultrawideband Antennas / H.Schantz // Norwood, MA : Artech House. – 2005. – 561 p.
10. Макурин М.Н. Расчет характеристик биконической антенны методом частичных областей / М.Н. Макурин, Н.П. Чубинский // РЭ. – 2007. – Т. 52, № 10. – 1199 с.

Referenses:

1. Rembovskiy, A.M., Ashikhman, A.V. and Koz'min V.A. (2006), *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva*, in Rembovskiy, A.M. (Ed.), Goryachaya liniya, Telekom, Moscow, 492 p.
2. Rotkhammel', K. (1979), *Antenny*, translated by Kazanskiy, N., Energiya, Moscow, 512 p.

3. Sundaram, K.R. and Mallik, R.J. (2000), "Module conversion method for estimating the direction of arrival", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, No. 36 (4), pp. 1391–1396.
4. Mezin, V.K. (1969), *Avtomaticheskie radiopelengatory*, Sovetskoe radio, Moscow, 215 p.
5. Moell, J.A. (1995), "Good Doppler Gets Better", *73 Magazine*, pp. 68–73.
6. Jacobs, E. and Ralston, E. (1981) "Ambiguity resolution in interferometry", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, No. 17 (6), pp. 766–780.
7. Amert, A.K. and Whites, K.W. (2009), "Miniaturization of the biconical antenna for UWB applications", *IEEE Transaction on antennas and propagation*, No. 12, pp. 3728–3735.
8. Kim, J. and Ook, S. (2004), "Novel ultra-wideband discone antenna", *Microwave And Optical Technology Letters*, No. 2, pp. 113–115.
9. Schantz, H. (2005), *The Art and Science of Ultrawideband Antennas*, Artech House, Norwood, 561 p.
10. Makurin, M.N. and Chubinskiy, N.P. (2007), "Расчет характеристик биконической антенны методом частотных областей", *Radioelektronika*, Vol. 52, No. 10, p. 1199.

КИРИЛЮК Володимир Анатолійович - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник начальник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– комп'ютеризовані інформаційні системи.

ЧЕРНЯВСЬКИЙ Георгій Петрович – кандидат військових наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– системи моніторингу, захисту і впливу.

МІХЄЄВ Юрій Іванович - кандидат технічних наук, начальник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– системи моніторингу, захисту і впливу.

ПІНЧУК Олег Іванович – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії наукового центру Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– інформаційні технології.

Стаття надійшла до редакції 23.05.2016