

В.В. Белоусов, С.А. Тузіков, О.В. Лукашук, Ю.І. Тригуб

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, Харків

ОГЛЯД ЛЬОТНОГО ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАСИВНОГО РАДІОТЕПЛОКАТОРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

В статті проведено аналіз щодо визначення впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на організм людей. Наголошено, що найбільш небезпечними для людини є мікрохвильові випромінювання (МХВ) радіолокаційних, радіорелейних станцій надвисокочастотного (НВЧ)-діапазону. Підкреслено, що радіолокаційні станції огляду льотного поля мають недоліки: недостатнє розрізнення протяжних і близько розташованих об'єктів із-за наявності "блискучих точок", виявлення їх роботи радіорозвідкою і придушення системою радіоелектронної протидії (РЕП). Тому, в статті пропонується здійснювати функції огляду льотного поля за допомогою пасивного радіотеплокатора міліметрового діапазону хвиль, принцип дії якого базується на тому, що будь-яке фізичне тіло з термодинамічною температурою вище абсолютного нуля, здатне випромінювати електромагнітну енергію в широкому спектральному діапазоні, зокрема, в міліметровому діапазоні хвиль. В статті також наведено теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження, які вказують на те, що рівень прийнятого сигналу залежить від контрасту температур радіояскравості "ціль-фон", площі поверхні об'єкту та його форми, дальності та ракурсу спостереження, діаграми спрямованості приймальної антени, висоти її підйому, чутливості радіометричного приймача, умов поширення хвиль міліметрового діапазону в атмосфері.

Ключові слова: мікрохвильові випромінювання, пасивний радіотеплокатор, міліметровий діапазон хвиль, льотне поле.

Вступ

Постановка проблеми. Задачі створення систем огляду льотного поля обумовлені зростанням вимог до безпечного застосування авіації в різних метеоумовах. Інформацію про переміщення літальних апаратів, паливозаправників, спецтехніки, особового складу літотранспорту керівник польотів може отримати візуально, за допомогою технічних засобів: оптичних, телевізійних та відеосистем, тепловізорів. Але в умовах поганій видимості ефективність їх мала. Ці задачі можуть виконувати активні радіолокаційні станції огляду льотного поля. Їх суттєві недоліки: недостатнє розрізнення протяжних і близько розташованих об'єктів із-за наявності "блискучих точок", виявлення їх роботи радіорозвідкою і придушення системою радіоелектронної протидії (РЕП) і, головне електромагнітного опромінення особового складу і обслуговуючого персоналу.

Аналіз літератури вітчизняних і зарубіжних авторів. Аналіз вітчизняної і зарубіжної літератури [1–5] показує, що проблема визначення впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на організм людей досліджувалася досить багато. Ефекти, що при цьому виникають, до сих пір не ясні і важко піддаються визначенню, тому ця тема залишається як і раніше актуальною. Спектр ЕМВ охоплює частоти приблизно від 10^{-3} до 10^{23} Гц. Нас найбільше цікавить радіочастотний діапазон (3 Гц до 3 000 ГГц) оскільки радіолокаційні системи (РЛС) працюють в діапазоні метрових (МХ), дециметрових (ДМХ), сантиметрових (СМХ) і міліметрових (ММХ) довжин хвиль [2].

Антенні РЛС формують вузькі діаграми спрямованості (ДС) шириною $2\theta_{0,5} \leq 2^\circ$ при коефіцієнті спрямованості дії (КСД) D у десятки-сотні тисяч одиниць. Сигнал, що випромінюється ними, принципово відрізняється від випромінювання інших джерел. Пов'язано це з тим, що періодичне переміщення антени в просторі призводить до просторової уривчастості опромінення. Тимчасова уривчастість опромінення обумовлена циклічністю роботи радіолокатора на випромінювання. Час напрацювання в різних режимах роботи радіотехнічних засобів може обчислюватися від декількох годин до доби.

Так, наприклад, РЛС огляду льотного поля в більшості випадків працюють цілодобово. Ширина ДС в горизонтальній площині зазвичай становить кілька градусів, а тривалість опромінення за період огляду становить десятки мілісекунд. Вони створюють щільність потоку енергії (ЩПЕ) $\approx 0,5$ Вт/м² на відстані 60 м [3].

Порівняння рівнів випромінювань, що створюються РЛС та іншими джерелами НВЧ-діапазону, наведено на рис. 1.

Зростання потужності радіолокаторів різного призначення і використання гостроспрямованих антен кругового огляду призводить до значного збільшення інтенсивності ЕМВ НВЧ-діапазону і створює на місцевості зони великої протяжності з високою щільністю потоку енергії. Найбільш несприятливі умови відзначаються в житлових районах міст, в межах яких розміщуються військові аеродроми та аеропорти.

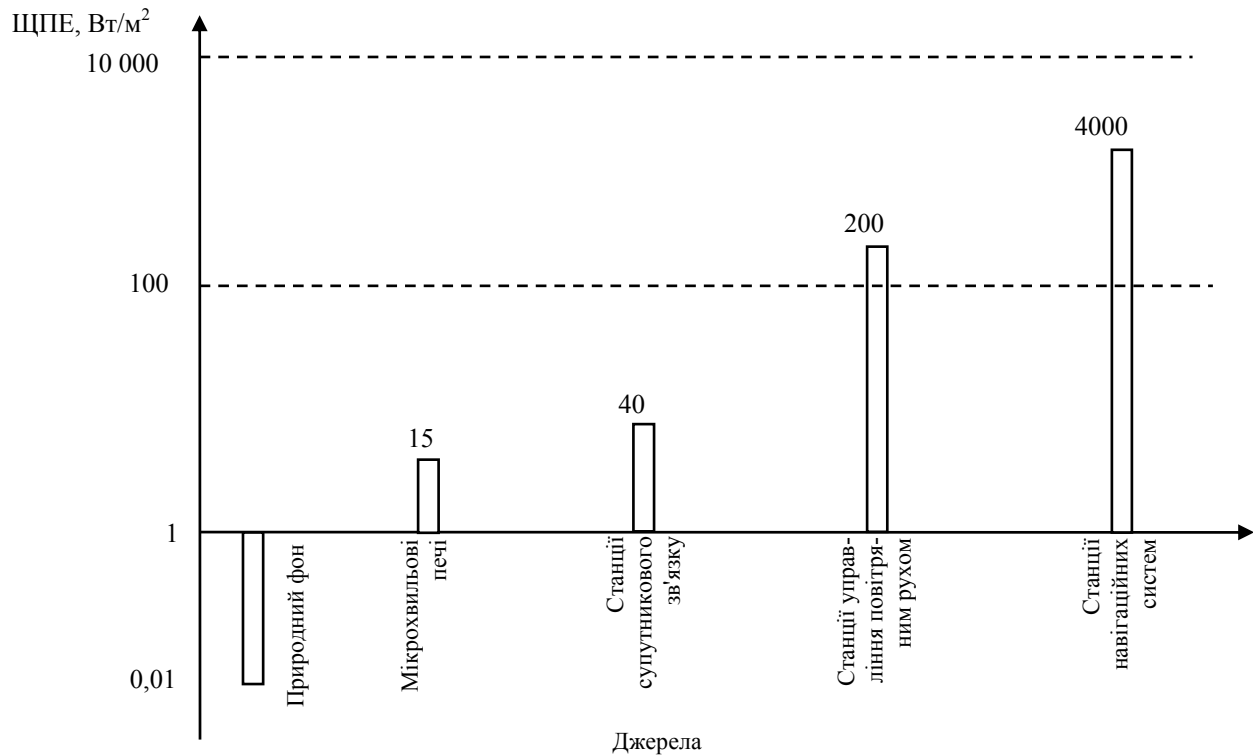


Рис. 1. Порівняння рівнів випромінювань, що створюються РЛС та іншими джерелами НВЧ-діапазону

Вплив ЕМВ на організм людини носить біологічний характер і експериментальні дані як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників свідчать про високу біологічну активність ЕМВ в усіх частотних діапазонах. При відносно високих рівнях ЕМВ сучасна теорія визнає *тепловий та нетепловий механізми* впливу. При відносно низькому рівні ЕМВ (наприклад, для радіочастот вище 300 МГц це менше 1 мВт / см²) прийнято говорити про *нетепловий або інформаційний* характер впливу на організм. Механізми дії ЕМВ в цьому випадку ще мало вивчені.

Серед усього спектру найбільшою біологічною значимістю і виразністю симптоматики виділяються ЕМВ діапазонів ДМХ, СМХ і ММХ. Залежно від інтенсивності і тривалості їх впливу викликані зміни в організмі поділяють на зміни *гострого* (термогенного) і *хронічного* (атермального) впливу. Гостра дія обумовлена термічним впливом ЕМВ, як правило, при порушенні техніки безпеки. Термогенний вплив зазвичай носить локальний характер, а симптоматика, що виникає, визначається топографією області, що опромінюється. Наслідки при опроміненні: загальне нездужання, головний біль, запаморочення, нудоту, блювоту, відчуття страху, спрагу, легку слабкість, болі в кінцівках, підвищену пітливість, підвищення температури тіла, напади тахікардії, порушення серцевої діяльності, артеріальна гіпертензія. Суб'єктивна та об'єктивна симптоматика у постраждалих через кілька днів зникає, всі клінічні показники приходять до доклінічного рівню, повністю відновлюється працездатність.

Найбільш широко в літературі представлені відомості, що стосуються клінікоепідеміологічного характеру хронічного впливу ЕМВ. За даними ряду вітчизняних авторів, найбільш ранніми клінічними проявами наслідків впливу ЕМВ на людину від джерел ДМХ, СМХ і ММХ діапазонів, виявляється різноманітна неврологічна симптоматика як суб'єктивного, так і об'єктивного характеру.

Найбільш характерними в динаміці змін реакції організму на хронічний вплив ЕМВ є реакції центральної нервової і серцево-судинної систем, а також системи крові.

Функціональні порушення з боку нервової системи, які проявляються, перш за все, у вигляді вегетативних дисфункцій неврастенічного і астеничного синдрому. При цьому виділяють три провідних синдрому: астеничний, астеновегетативний і гіпоталамічний.

Порушення з боку серцево-судинної системи проявляються, як правило, нейроциркуляторною дистонією: лабільність пульсу і артеріального тиску, схильність до гіпотонії, болі в області серця та ін. Відзначаються також фазові зміни складу периферичної крові з подальшим розвитком помірної лейкопенії, нейропенії, еритроцитопенії.

Деякі автори вважають, що хронічні впливи ДМХ, СМХ і ММХ діапазонів при інтенсивності менш 10 Вт/м² можуть викликати в системі крові різні нестійкі зміни:

- лейкоцитоз,
- збільшення кількості лімфоцитів.

Іноді відзначають моноцитоз, патологічну зернистість нейтрофілів, ретикулоцитоз і тромбоцитопенію.

Зміни кісткового мозку носять характер реактивної компенсаторної напруги регенерації. Зазвичай ці зміни виникають у осіб які за родом своєї роботи постійно перебували під дією електромагнітного випромінювання з досить великою інтенсивністю. Персонал, що працює з магнітним і електромагнітним полями, а також населення, яке живе в зоні дії потужних радіопередавальних установок, скаржаться на дратівливість, нетерплячість. Через 1–3 роки у деяких з'являється почуття внутрішньої напруженості, метушливість. Порушуються увага і пам'ять. Виникають скарги на малу ефективність сну і на стомлюваність.

Біологічними дослідженнями встановлено, що до найбільш чутливих до впливу ЕМВ (крім центральної нервової системи та очей) відносяться гонади - статеві органи. При цьому у чоловіків виявлено досить високий відсоток випадків імпотенції, зниження тестостерону в крові. У жінок можуть спостерігатися порушення дітородної функції (токсикози вагітності, мимовільні викидні, патологія пологів).

Поля радіочастотного діапазону є неіонізуючі

випромінювання [4]. На відміну від рентгенівських променів і гамма-променів, вони занадто слабкі для того, щоб розірвати внутрішньо-молекулярні або внутріатомні зв'язки і, таким чином, викликати іонізацію. Однак поля радіочастотного діапазону можуть надавати різний вплив на біологічні системи, такі як клітини, рослини, тварини і людина. Характер цього впливу залежить від частоти і напруженості поля.

На більш високих частотах (понад 300 МГц) довжина хвилі менше розмірів тіла людини, що обумовлює тільки локальну дію ЕМП.

рім того, з підвищенням частоти зменшується глибина проникнення електромагнітних коливань в організм.

Глибина проникнення залежить не тільки від частоти зовнішнього ЕМП, а й від електричних властивостей тканин, в які воно проникає. Для жирової і кісткової тканин ця величина на порядок більше, ніж для м'язової.

Поля з частотою від 1 ГГц до 10 ГГц проникають всередину тканин і викликають нагрів в зв'язку з поглинанням енергії в цих тканинах. Глибина проникнення полів радіочастотного діапазону в тканину залежить від частоти поля: чим менше частота, тим глибше проникнення табл. 1 [5].

Таблиця 1

Глибина проникнення ЕМП в різні тканини (см)

Тканина	Частота, МГц					
	100	200	400	1000	3000	10000
Кістковий мозок	22,9	20,66	18,37	11,90	9,92	0,34
Головний мозок	3,55	4,13	2,07	1,93	0,47	0,16
Кришталік ока	9,42	4,39	4,23	2,91	0,50	0,17
Кров	2,86	2,15	1,79	1,40	0,78	0,14
М'язи	3,45	2,32	1,84	1,46	–	0,31
Шкіра	3,76	2,78	2,18	1,64	0,64	0,18

Серед безлічі електромагнітних явищ на особливу увагу заслуговують мікрохвильові випромінювання (МХВ), причому найбільш істотний внесок в мікрохвильове забруднення навколишнього середовища вносять радіолокаційні та радіорелейні станції та інші об'єкти, робота яких заснована на генерації ЕМВ НВЧ-діапазону. У людей, які працюють на тропосферних, супутникових, радіо- і радіолокаційних станціях, з'являються головний біль, дратівливість, сонливість, ослаблення пам'яті і т.д.

Таким чином, дані клініко-епідеміологічних досліджень про вплив ЕМВ ДМХ, СМХ і ММХ діапазонів на організм людини свідчать, що вираженість спостережуваних змін залежить від інтенсивності і часу впливу. Загальна картина змін під впливом різних рівнів ЕМВ представлена в табл. 2.

Наявні результати свідчать про можливість комбінованої дії ЕМП та інших факторів, тобто

модифікації біоефектів ЕМП як теплової, так і нетеплової інтенсивності під впливом ряду факторів як фізичної, так і хімічної природи. Умови комбінованої дії ЕМП та інших факторів дозволили виявити значний вплив ЕМП надмалих інтенсивностей на реакцію організму, а при деяких сполученнях може розвинути яскраво виражена патологічна реакція.

Таким чином виходячи з проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

1. Найбільш небезпечними для людини є мікрохвильові випромінювання (МХВ), причому найбільш істотний внесок в мікрохвильове забруднення навколишнього середовища вносять радіолокаційні та радіорелейні станції та інші об'єкти, робота яких заснована на генерації ЕМВ НВЧ-діапазону.

2. До найбільш чутливих систем організму людини до ЕМВ відносяться:

Можливі зміни в організмі людини під впливом ЕМВ різних інтенсивностей

Інтенсивність ЕМВ, мВт/см ²	Спостережувані зміни
600	Больові відчуття в період опромінення
200	Пригнічення окисно-відновних процесів в тканини
100	Підвищений артеріальний тиск з подальшим його зниженням; в разі впливу – стійка гіпотензія, двостороння катаракта
40	Відчуття тепла. Розширення судин. При опроміненні 0,5–1 ч підвищення тиску на 20–30 мм рт. ст.
20	Стимуляція окислювально-відновних процесів в тканини
10	Астенізація після 15 хв. опромінення, зміна біоелектричної активності головного мозку
8	Невизначені зрушення з боку крові із загальним часом опромінення 150 ч, зміна згортання крові
6	Електрокардіографічні зміни, зміни в рецепторному апараті
4–5	Зміна артеріального тиску при багаторазових опромінюваннях, нетривала лейкопенія, еритропенія
3–4	Ваготоніческа реакція з симптомами брадикардії, уповільнення електропровідності серця
2–3	Виражений характер зниження артеріального тиску, тенденція до почастішання пульсу, незначні коливання об'єму серця
1	Зниження артеріального тиску, тенденція до почастішання пульсу, незначні коливання об'єму крові серця. Зниження офтальмотонуса при щоденному впливі протягом 3,5 місяців
0,4	Слуховий ефект при впливі імпульсних ЕМП
0,3	Деякі зміни з боку нервової системи при хронічному впливі протягом 5–10 років
0,1	Електрокардіографічні зміни
до 0,05	Тенденція до зниження артеріального тиску при хронічному впливі

А. Нервова система. Одна з найбільш чутливих систем до впливу ЕМП на рівні молекул ДНК. Характерні відхилення: зміна вищої нервової діяльності; ослаблення пам'яті; розвиток стресових реакцій; розвиток неврастенічного і астенічного синдрому (слабкість, дратівливість, швидка стомлюваність, порушення сну, внутрішня напруженість, метушливість); зорове стомлення.

Б. Імунна система. Характерні відхилення: виникнення імунodefіциту по тимус-залежній клітинній популяції лімфоцитів; порушення процесів імуногенезу; обтяження інфекційного процесу; зміна антигенної структури тканин; посилення утворення антитіл по відношенню до тканин плода.

В. Ендокринна система. Характерні відхилення: зміна в гіпофіз – надниркової системи, що супроводжується: збільшенням вмісту адреналіну в крові; активацією процесів згортання крові.

Г. Статева система. Характерні відхилення: порушення статевої функції, пов'язаної зі зміною її регуляції з боку нервової та нейроендокринної систем, що супроводжується: зниженням активності гіпофіза; внутрішньоутробному пошкодженню плоду, в різні стадії вагітності; передчасними пологами.

Мета статті. У статті пропонується здійснювати функції огляду льотного поля за допомогою пасивного радіотеплолокатора (РТЛ) міліметрового діапазону хвиль ММХ.

Виклад основного матеріалу

Радіотеплове випромінювання об'єктів і способи його прийому. Принцип дії пасивного радіотеплолокатора (РТЛ) діапазону ММХ базується на тому, що будь-яке фізичне тіло з термодинамічною температурою вище абсолютного нуля, здатне випромінювати електромагнітну енергію в широкому спектральному діапазоні, зокрема, в діапазоні ММХ. Інтенсивність випромінювання тіла оцінюється його радіояскравою температурою і визначається в Кельвінах ($1\text{К} \approx 10^{-16}\text{Вт}$) [6–13].

Крім власного випромінювання металеві предмети за рахунок високої питомої провідності інтенсивно перевипромінюють радіотеплове випромінювання протяжних фонових джерел (атмосфера, різні типи земної поверхні, бетонні споруди та ін.) [6–12].

Спектральна щільність енергії, що випромінюється, являється функцією температури тіла T та частоти f і визначається формулою Планка [6]:

$$N_0 = \frac{2\pi f^3}{c^2} \left[\frac{1}{\exp(p/hT) - 1} \right], \quad (1)$$

де $p = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка;
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість поширення електромагнітної енергії у вільному просторі;
 $h = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – стала Больцмана.

Спектральна щільність N_0 , що має розмірність Вт/(Гц·м²), характеризує потужність, що випромінюється одним м² поверхні тіла на частоті f у смузі 1 Гц.

Спектральна щільність N_0 розподілена нерівномірно по спектру частот, досягаючи максимуму на частоті

$$f_{\text{макс}} = 10^2 T, \text{ ГГц.}$$

При температурі тіла $T=300$ К $f_{\text{макс}}=3 \cdot 10^4$ ГГц, що відповідає довжині хвилі $\lambda=10$ мкм. Із цього витікає, що максимум здатності випромінювати енергію, приходить на діапазон інфрачервоних хвиль.

При розрахунках спектральної щільності випромінювання в діапазонах СМХ та ММХ формула (1) спрощується тому, що показник експоненти на цих частотах має малу величину. Здійснюючи заміну $\exp(x)=1+x$ при $x \rightarrow 0$ отримуємо

$$N_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda^2} \right) \cdot hT. \quad (2)$$

Ця формула (закон Релея-Джинса) дозволяє з достатньо високою точністю обчислювати спектральну щільність абсолютно чорного тіла (АЧТ) в діапазонах СМХ та ММХ при $T > 100$ К. Однак випромінювання реальних тіл у ряді випадків значно відрізняється від випромінювання АЧТ. Цю відмінність можна урахувати, якщо в (2) ввести коефіцієнт поглинання ν , що характеризує здатність тіла випромінювати. Тоді

$$N_0 = \nu \cdot N_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda^2} \right) \cdot h \cdot \nu T. \quad (3)$$

Цей вираз представляє собою математичний запис закону Кіргхофа, що встановлює зв'язок між здатностями тіла поглинати та випромінювати електромагнітну енергію.

Для АЧТ $\nu=1$, а для гладких металевих об'єктів $\nu=0$. Із цього випливає висновок: чим краще тіло поглинає електромагнітну енергію, тим інтенсивніше воно випромінює на цій частоті. Спектральна щільність прямо пропорційна температурі тіла і зворотно пропорційна квадрату довжини хвилі. Отже, власне випромінювання тіла в діапазоні ММХ буде більше, ніж в діапазоні СМХ.

Добуток νT носить назву яскравої температури тіла T_y .

Для АЧТ $T_y=T$.

Із цього слідує, що анти-радіолокаційні покриття, що наносяться на літаки за технологією Stealth, радіомаскировку забезпечити не зможуть, бо стають добрими випромінювачами.

Металеві об'єкти через велику питому провідність мають $T_y=10-20$ К [7–9].

Але вони здатні інтенсивно перевипромінювати радіотеплове випромінювання зовнішніх фонових джерел (земної поверхні, атмосфери, навколишніх об'єктів та ін.).

Результуюче радіотеплове випромінювання реального тіла оцінюється його удаваною температурою

$$T_y(\theta) = \nu(\theta) + R(\theta)T_\phi, \quad (4)$$

де $R(\theta) = 1 + \nu(\theta)$ – модуль коефіцієнта відбиття у напрямку кута θ ;

T_ϕ – яскрава температура навколишнього фону, К.

Удавана температура на відміну від яскравої може перевищувати абсолютну температуру тіла (об'єкта). Спектральна щільність випромінювання таких тіл розраховується за формулою

$$N_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda^2} \right) \cdot h \cdot \nu \cdot T_y(\theta). \quad (5)$$

Потужність радіотеплового випромінювання залежить від багатьох факторів площі об'єкту, його форми, рельєфу, кута візування, метеорологічних умов. Таку ж складну залежність має і уявна температура.

Радіотеплове випромінювання навколишнього фону. Для спостереження природних об'єктів або виявлення на їх фоні малорозмірних цілей дуже важливо мати дані про їх яскраву температуру. Ці виміри здійснюються радіометричними приймачами, що розташовуються не тільки на землі, а і на літаках, безпілотних літальних апаратах (БПЛА) та космічних апаратах [10-13]. Характерні величини яскравих температур T_ϕ та коефіцієнтів поглинання ν деяких об'єктів при $\theta=0^\circ$ на довжині хвилі $\lambda=8,6$ мм наведено в табл. 3 [10].

З табл. 3 видно, що більшість протяжних об'єктів є поверхнями, що випромінюють, а металеві предмети здатні перевипромінювати випромінювання фону і, зокрема, атмосфери, що падає на них. Яскрава температура небосхилу залежить від метеорологічних умов, довжини хвилі та кута візування.

У напрямку зеніту ($\theta=0^\circ$) безхмарна атмосфера має $T_{\text{атм}}=20-40$ К. [9].

В інших напрямках ($\theta \leq 85^\circ$) функціональна залежність $T_{\text{атм}}(\theta)$ визначається законом секанса

$$T_{\text{атм}}(\theta) = T_{\text{атм}} \sec \theta. \quad (6)$$

Графічну залежність $T_{\text{атм}}(\theta)/T_{\text{атм}}$ зображено на рис. 2, з якого видно, що при збільшенні кута візування яскрава температура зростає і може перевищувати температуру в zenіті у декілька разів

Таблиця 3

Значення характерних величин

Об'єкти	ν	T_{ϕ}, K
Трава	1,0	280-300
Сухий ґрунт	0,93	260-270
Бетонна ЗПС	0,85	240-250
Спорути із цегли	0,8	230-260
Крига	0,7	190-210
Вологий ґрунт	0,63	170-190
Гладка водна поверхня	0,45	130-160
Металеві об'єкти	≈ 0	≈ 0

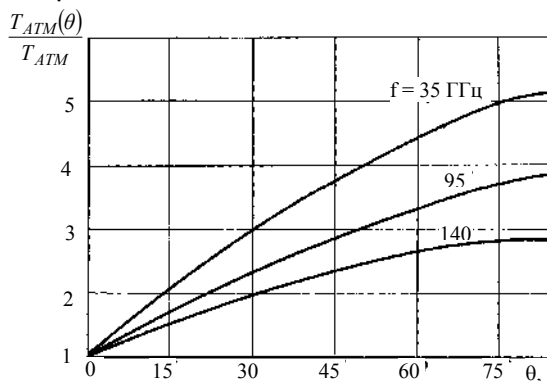


Рис. 2. Графічна залежність $T_{\text{атм}}(\theta)/T_{\text{атм}}$

Прийом радіотеплового випромінювання.

Прийом радіотеплового випромінювання здійснюється високочутливими приймачами – радіометрами, чутливість яких $\Delta T_{\text{мін}}$ досягає десятих і навіть сотих доль K [10]. Інтенсивність прийнятого сигналу оцінюється антенною температурою [7]

$$T_A(\theta) = \eta_A \times \frac{S_{\text{ц}}(\theta) T_y(\theta) A_{\text{еф}}}{\lambda^2 r^2} \exp(-W \sec \theta), \quad (7)$$

де η_A – ККД антени;

$S_{\text{ц}}(\theta)$ – площа, що спостерігається, м^2 ;

$A_{\text{еф}} = S_A \delta_A$ – ефективна площа антени, м^2 ;

S_A – геометрична площа антени, м^2 ;

δ_A – коефіцієнт, що враховує амплітудний розподіл поля в розкритті антени (0,75);

r – відстань до цілі, км;

λ – довжина хвилі, мм;

W – повне поглинання потоку енергії, дБ.

Повне (інтегральне) поглинання потоку енергії обумовлено поглинаннями молекулами кисню α_1 та парами води α_2 .

Частотна залежність коефіцієнтів поглинання ММХ представлена на рис. 3 [8].

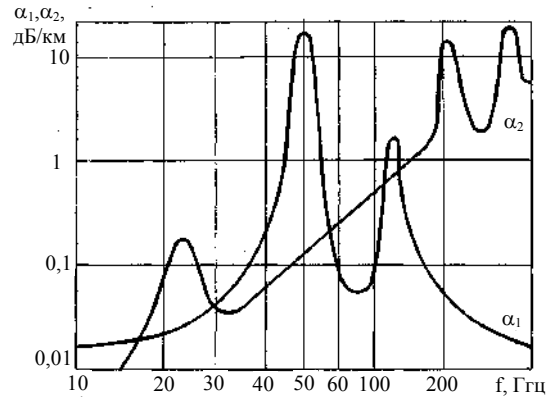


Рис. 3. Частотна залежність коефіцієнтів поглинання ММХ

З рис. 3 видно, що в інтервалах:

$f = 35 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 8,6 \text{ мм}$),

$f = 95 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 3,2 \text{ мм}$),

$f = 140 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 2,1 \text{ мм}$)

$f = 220 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 1,4 \text{ мм}$)

поглинання мінімальне. Ці області називаються “вікнами прозорості”.

Окрім поглинання ММХ в газах земної атмосфери має місце послаблення цих хвиль в гідрометеорох. До гідрометеорів зазвичай відносять усі водні утворення в рідкій або твердій фазі – дощ, сніг, град, туман, хмари та ін. При оцінці послаблення ММХ в гідрометеорних утвореннях окрім коефіцієнтів послаблення необхідно мати статистичні дані про повторюваність цих утворень та їх просторову структуру. Частотна та висотна залежність сумарного коефіцієнта поглинання α_{Σ} ММХ атмосферою Землі показана на рис. 4.

З аналізу рис. 3 та 4 можна зробити висновок, що для побудови локатора огляду льотного поля доцільно застосовувати ММХ довжиною

$$\lambda = 8,6 \text{ мм} (f = 35 \text{ ГГц}),$$

бо вони мають мінімальне поглинання в атмосфері [8].

Для спостереження цілі на будь-якому фоні необхідно, щоб між ними був контраст антенних температур

$$\Delta T_{\text{ц}}(\theta) = T_y(\theta) - T_{\phi}(\theta), \quad (8)$$

величина та знак якого залежать від різниці їх уявних температур і кута візування [9].

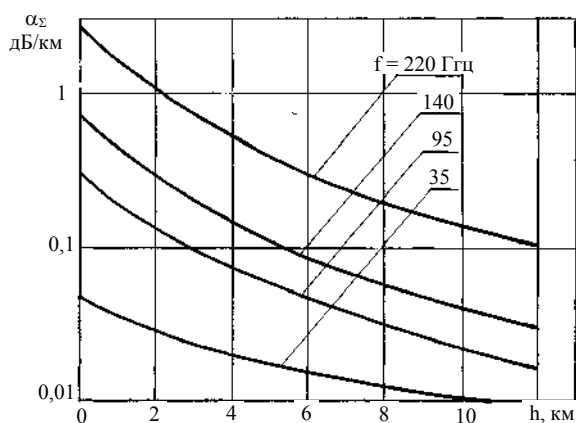


Рис. 4. Частотна та висотна залежність сумарного коефіцієнта поглинання α_s ММХ атмосферою Землі

Вихідний сигнал радіометра, що відповідає цій різниці, визначається виразом

$$T_A(\theta) = \eta_A \times \frac{S_{\text{ц}}(\theta) \Delta T_{\text{ц}}(\theta) A_{\text{еф}}}{\lambda^2 r^2} \exp(-W \sec \theta). \quad (9)$$

Для прийому сигналу із заданою ймовірністю правильного виявлення $P_{\text{ПВ}}$ і помилкової тривоги $P_{\text{ПТ}}$ необхідно, щоб

$$\Delta T_A \geq q \Delta T_{\text{мін}}, \quad (10)$$

де q – задане співвідношення сигнал/шум.

Так, для виявлення цілі з $P_{\text{ПВ}} = 0,97$ і $P_{\text{ПТ}} = 10^{-3}$ необхідно, щоб $q \geq 5$ [10].

Дальність виявлення цілі радіотеплолокатором можна визначити із (9) з урахуванням умови (10)

$$r = \sqrt{\eta_A \frac{S_{\text{ц}}(\theta) \Delta T_{\text{ц}}(\theta) A_{\text{еф}}}{\lambda^2 \Delta T_{\text{мін}} q} \exp(-W \sec \theta)}. \quad (11)$$

Результати розрахунку дальності виявлення літака військово-транспортної авіації для вихідних даних:

$$\lambda = 8,6 \text{ мм};$$

$$\text{радіус антени } a = 0,5 \text{ м};$$

$$\Delta T_{\text{мін}} = 0,25 \text{ К};$$

$$\text{кут візування } \theta$$

представлені на рис. 5.

З аналізу графіка виходить, що навіть при невеликих значеннях кута візування дальність виявлення літака з вірогідністю не гірше заданої складає декілька кілометрів.

При спостереженні за цілями під кутами $\theta \rightarrow 0^\circ$ контраст радіояскравих температур збільшується і може досягати (15–200 К) тому, що радіояскара температура атмосфери в цьому напрямку мінімальна (20–40 К), а температура поверхні (200–300 К).

Чутливість сучасних радіометричних приймачів лежить у межах (0,01–0,1 К). Отже, для збільшення дальності виявлення цілей (об'єктів) радіотеплолокатор треба розміщувати як можна вище, наприклад, на вежі або встановлювати на безпілотних літальних апаратах [13].

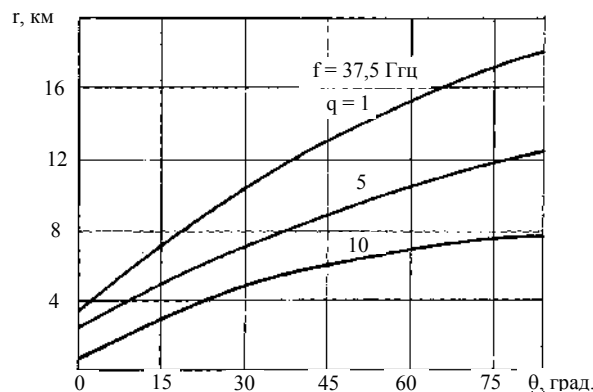


Рис. 5. Результати розрахунку дальності виявлення літака військово-транспортної авіації

Висновки

1. Найбільш небезпечними для людини є мікрохвильові випромінювання (МХВ) радіолокаційних, радіорелейних станцій та інших об'єктів, робота яких заснована на генерації ЕМВ НВЧ-діапазону.

2. Активні радіолокаційні станції огляду льотного поля мають суттєві недоліки: недостатнє розрізнення протяжних і близько розташованих об'єктів із-за наявності "блискучих точок", виявлення їх роботи радіорозвідкою і придушення системою РЕП.

3. Перехід в діапазон ММХ дозволяє на порядок підвищити розрізняльну здатність радіолокаційних систем у порівнянні з діапазоном СМХ при збереженні розмірів антенних пристроїв.

4. Для виключення НВЧ-опромінення особового складу огляд льотного поля доцільно здійснювати методом пасивної радіотеплолокації.

5. Усі об'єкти, здатні поглинати електромагнітну енергію, випромінюють її в широкому спектральному діапазоні, у тому числі в діапазоні ММХ.

6. Результуюче випромінювання реального тіла оцінюється його уявною температурою, що враховує як власне випромінювання тіла, так і випромінювання навколишнього фону.

7. Для виявлення цілі на будь-якому фоні необхідно, щоб між ними існував радіояскравий контраст, величина і знак якого залежать від різниці їх уявних температур, кута спостереження та умов поширення хвиль в атмосфері Землі.

8. На основі пасивних радіотеплолокаторів можна створювати локатори огляду льотного поля, посадкові локатори для необладнаних аеродромів, системи огляду земної поверхні для БПЛА та ін.

Список літератури

1. Лебедева Н.Н. Реакция центральной нервной системы человека на электромагнитные поля с различными биотропными параметрами / Н. Н. Лебедева // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1998. – № 1. – С. 24-36.
2. International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields // *Health Phys.* 1998. – V. 74 (4). – 494 p.
3. Экологический мониторинг электромагнитных полей / Г. В. Федорович. – М., 2004. – 140 с.
4. Методологія оцінки дії електромагнітного поля на природні екосистеми / С.А. Тузіков, А.В. Писарев, А.Ф. Лазутський, В.В. Яценко // IV Міжнародна науково-методична конференція “Безпека людини в сучасних умовах”: зб. тез доповідей Міжнародної конференції НТУ “ХПІ”. – Харків: НТУ «ХПІ», “Міськдрук”, 2012. – С. 97-99.
5. Основы электромагнитной экологии / Ю. М. Сподобаев, В. П. Кубанов. – М.: Радио и связь, 2000. – 240 с.
6. Распространение радиоволн / Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург. – М.: Издательство технико-теоретической литературы, 1953. – 882 с.
7. Радиотеплокация / А.Г. Николаев, С.В. Перцов. – М: Воениздат, 1970. – 132 с.
8. Белоусов В.В. Особенности распространения миллиметровых волн в атмосфере Земли и перспективы использования их для целей радиолокации / В.В. Белоусов, А.А. Иванов // Повышение эффективности авиационных радиоэлектронных систем: Сборник научных материалов. – Вып. III. – Харьковское ВВАУС, 1983. – С. 61-68.
9. Белоусов В.В. Калибровка по Солнцу пассивного лоатора миллиметрового диапазона волн / В.В. Белоусов, С.В. Бутакова // ИПРЖР-электромагнитные волны и электронные системы. – 2001. – № 6(4). – С. 55-63.
10. Белоусов В.В. Особливості застосування радіотеплокаціонів в авіації / В.В. Белоусов, С.В. Бутакова // Авіаційно-космічна техніка і технології. – 2001. – X. : НАКУ (ХАІ). – С. 28-36.
11. Белоусов В.В. Об'єктивна необхідність освоєння діапазону міліметрових хвиль / В. В. Белоусов, Л. В. Кунчиков // Новітні технології – для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Одинадцятій наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – Харків, 2015. – 348 с.
12. Белоусов В.В. Принципи побудови пасивного лоатора огляду льотного поля міліметрового діапазону хвиль / В.В. Белоусов, Н.І. Килимиста // Новітні технології – для захисту повітряного простору: зб. тез доповідей Одинадцятій наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – Харків, 2015. – 347 с.
13. Белоусов В.В. Радиометричний метод огляду переднього краю / О.В. Лукашук, В.В. Белоусов // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних Військ: зб. тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції Львів, 11-12 травня 2017 р. – Львів: Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, 2017. – С. 77-78.

References

1. Lebedeva, N.N. (1998), “Reaktsiya tsentralnoy nervnoy sistemy cheloveka na elektromagnitnyye polya s razlichnymi biotropnymi parametrami” [Reaction of the central nervous system of man to electromagnetic fields with various biotropic parameters], *Biomedical radioelectronics*, No. 1, pp. 24-36.
2. “International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (1998), Guidelines for limiting exposure to time-varying electric magnetic and electromagnetic fields”, *Health Phys*, No. 74(4), 494 p.
3. Fedorovich, G.V. (2004), “Ekologicheskiy monitoring elektromagnitnykh poley” [Ecological monitoring of electromagnetic fields], *Moscow*, 140 p.
4. Tuzikov, S.A., Pisarev, A.V., Lazutskiy A.F. and Yatsenko, V.V. (2012), “Metodologiya otsinki dii elektromagnitnoy polya na prirodni ekosistemi” [Methodology of the field of the electromagnet field on natural ecosystems], *IV International scientific and methodical conference NTU "KhPI" "Safety of man is in modern terms" Materiel of the International Conference NTU "KhPI", Khar'kov, "Miskdruk"*, pp. 97-99.
5. Spodobayev, Yu.M. and Kubanov, V.P. (2000), “Osnovy elektromagnitnoy ekologii” [Fundamentals of electromagnetic ecology], *Radio and Communication, Moscow*, 240 p.
6. Alpert, Ya.L. and Ginzburg, V.L. (1953), “Rasprostraneniye radiovoln” [Propagation of radio waves], *Izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, Moscow*, 882 p.
7. Nikolayev, A.G. and Pertsov, S.V. (1970), “Radioteplokatsiya” [Radioteplotcation], *Voyenizdat, Moscow*, 132 p.
8. Belousov, V.V. and Ivanov, A.A. (1983), “Osobennosti rasprostraneniya millimetrovnykh voln v atmosfere Zemli i perspektivy ispolzovaniya ikh dlya tseyley radiolokatsii” [Features of the propagation of millimeter waves in the Earth's atmosphere and the prospects for using them for radar purposes], *Increasing the efficiency of aviation radio-electronic systems" Collection of scientific materials, Issue. III, Kharkov VVAUS*. pp. 61 – 68.
9. Belousov, V.V. and Butakova, S.V. (2001), „Kalibrovka po Solntsu passivnogo lokatora millimetrovogo diapazona voln” [Calibration on a sun of passive radar of millimetric range of waves], *IPRZHR-electromagnetic waves and electronic systems*, pp.55-63.
10. Belousov, V.V. and Butakova, S.V. (2001), “Osoblivosti zastosuvannya radioteplokokatoriv v aviatsii” [Features of application of radioteplotkokatoriv are in an aviation.], *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnologii-Kharkov, NAKU*, pp. 393-400.
11. Belousov, V.V. and Kunchikov, L.V. (2015), “Obektivna neobkhdnist osvoennya diapazonu milimetrovikh khvil” [Objective necessity of mastering of range of millimetric waves], *11th ScienScientific Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University: New technologies – for air space protection, Kharkiv*, pp. 348.
12. Belousov, V.V. and Kilimista, N.I. (2015), “Printsipi pobudovi pasivnogo lokatora oglyadu lotnogo polya milimetrovogo diapazonu khvil” [Principles of construction of passive radar of review of the flying field of millimetric range of waves], *11th ScienScientific Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University: New technologies – for air space protection, Kharkiv*, pp. 347.
13. Belousov, V.V. and Lukashuk, O.V. (2017), “Radiometrychnyy metod ohlyadu peredn'oho krayu” [Aerophare method of review of cutting edge], *International scientific and technical conference: Development prospects weapons and military equipment leave war, Lviv, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy*, pp. 77-78.

Відомості про авторів:

Белоусов Володимир Васильович

кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2872-7933>
e-mail: belousov.vld@gmail.com

Тузіков Сергій Анатолійович

кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5919-1137>
e-mail: tsa.53@ukr.net

Лукашук Олена Вячеславівна

кандидат технічних наук
доцент кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8721-2433>
e-mail: dlyavac@ukr.net

Тригуб Юрій Ігорович

викладач Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6785-0286>
e-mail: triguburii31@gmail.com

Information about the authors:

Vladimir Belousov

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2872-7933>
e-mail: belousov.vld@gmail.com

Sergey Tuzikov

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
[e https://orcid.org/0000-0001-5919-1137](https://orcid.org/0000-0001-5919-1137)
e-mail: tsa.53@ukr.net

Olena Lukashuk

Candidate of Technical Sciences
Senior Lecturer of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8721-2433>
e-mail: dlyavac@ukr.net

Yurii Trigub

Instructor of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6785-0286>
e-mail: triguburii31@gmail.com

**ОБЗОР ЛЕТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПАССИВНОГО РАДИОТЕПЛОКАТОРА
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

В.В. Белоусов, С.А. Тузіков, Е.В. Лукашук, Ю.И. Тригуб

В статье проведен анализ литературы по определению влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на организм человека. Отмечено, что наиболее опасными для человека являются микроволновые излучения (МВИ) радиолокационных, радиорелейных станций сверхвысокочастотного (СВЧ)-диапазона. Подчеркнуто, что радиолокационные станции обзора летного поля имеют недостатки: недостаточное различение протяженных и близко расположенных объектов из-за наличия "блестящих точек", выявление их работы радиоразведкой и подавления системой радиоэлектронного противодействия (РЭП). Поэтому, в статье предлагается осуществлять функции обзора летного поля с помощью пассивного радиотеплокатора миллиметрового диапазона волн, принцип действия которого основан на том, что любое физическое тело с термодинамической температурой выше абсолютного нуля, способное излучать электромагнитную энергию в широком спектральном диапазоне, в частности, в миллиметровом диапазоне волн. В статье также приведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования, которые указывают на то, что уровень принимаемого сигнала зависит от контраста температур радиояркости "цель-фон", площади поверхности объекта и его формы, дальности и ракурса наблюдения, диаграммы направленности приемной антенны, высоты ее подъема, чувствительности радиометрического приемника, условий распространения волн миллиметрового диапазона в атмосфере.

Ключевые слова: микроволновые излучения, пассивный радиотеплокатор, миллиметровый диапазон волн, летное поле.

**OVERVIEW OF THE FLIGHT FIELD WITH THE PASSIVE RADIOTEPLocator
OF THE MILLIMETER RANGE LONG WAVES**

V. Belousov, S. Tuzikov, O. Lukashuk, Yu. Trigub

The article analyzes the literature on the influence of electromagnetic radiation (EMR) on the human body. It was noted that the most dangerous for humans are microwave radiations (MWI) of radar, microwave relay stations of microwave frequency (microwave) range. It is emphasized that radar stations of the airfield survey have disadvantages: insufficient discrimination of long and closely located objects due to the presence of "brilliant points", the identification of their work by radio reconnaissance and suppression by the electronic countermeasures (RE) system. Therefore, in the article it is proposed to perform functions of the flight field survey with the help of a passive millimeter-wave radioteplotor whose operation principle is based on the fact that any physical body with a thermodynamic temperature above absolute zero, capable of emitting electromagnetic energy in a wide spectral range, in particular, in a millimeter wave band. The article also presents theoretical calculations and experimental studies that indicate that the level of the received signal depends on the contrast of the target-background radio brightness, the surface area of the object and its shape, the range and angle of observation, the receive antenna's antenna pattern, the height of its rise, the sensitivity of the radiometric receiver, the conditions for the propagation of waves in the millimeter range in the atmosphere.

Keywords: microwave radiation, passive radioteplotor, millimeter wave band, airfield.