

3. ПАСИВНІ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

3.1. Характеристики радіотеплового випромінювання

Радіотеплове випромінювання площини S під кутом u до нормалі можна характеризувати щільністю потоку потужності P як [1]

$$\Pi = dP/dS \cos u \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

Спектр потужності радіотеплового випромінювання (суцільний та зазвичай нерівномірний) визначається спектральною щільністю потоку

$$\Pi_f = d\Pi/df \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{Гц)]}.$$

Щоб уникнути залежності від відстані до точки спостереження, використовують яскравість – спектральну щільність потоку потужності випромінювання на одиницю тілесного кута

$$B_f = d\Pi_f/d\Omega \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{ср)]}.$$

Інтенсивність випромінювання тіла залежить від його температури T_t . Для діапазону радіочастот яскравість випромінювання абсолютно чорного тіла, яке поглинає променеву енергію, що падає на нього та переводить її у тепло, описується за формулою Релея-Джинса [2]

$$B_f = 2kT_t/\lambda_B^2,$$

де λ_B – довжина хвилі електромагнітних коливань, що випромінюється.

Цей вираз дозволяє при розрахунку енергетичних характеристик радіометрів використовувати температуру випромінюючого абсолютно чорного тіла T_t . У реальних тілах радіотеплове випромінювання, яке виникає усередині тіла, частково відбивається його поверхнею і неповністю досягає точки прийому. Отже, сигнал, що приймається, слабшає, температура тіла, що уявляється (яскравісна або радіояскравісна), зменшується порівняно з реальною (термодінамічною) температурою. Яскравісна температура джерела дорівнює температурі абсолютно чорного тіла з тією ж

яскравістю у заданому спектральному діапазоні, що і дане тіло. Згідно з законом Кірхгофа яскравісна температура $T_{\text{я}}$ пропорційна температурі тіла $T_{\text{т}}$, тобто

$$T_{\text{я}} = \varepsilon T_{\text{т}}.$$

Коефіцієнт пропорційності $\varepsilon < 1$ називається випромінюючою здатністю та може виражатися через інтегральний коефіцієнт відбиття за потужністю (ρ)

$$\varepsilon = 1 - \rho.$$

Повне випромінювання реального тіла складається з двох складових: власного випромінювання і відбиття електромагнітних коливань, що падають на тіло з навколишнього простору. Інтенсивність повного випромінювання характеризується ефективною яскравісною температурою

$$T_{\text{яеф}} = (1 - \rho)T_{\text{т}} + \rho T_{\text{зв}}, \quad (3.1)$$

де $T_{\text{зв}}$ – яскравісна температура зовнішніх випромінювачів.

Під час огляду земної поверхні, крім сигналів від об'єктів, що спостерігаються, приймається випромінювання неба після відбиття або розсіювання Землею.

Випромінювальна здатність атмосфери, як і будь-якого іншого середовища, відповідно до закону Кірхгофа, визначається через її поглинаючу здатність. Елементарний шар атмосфери товщиною $d\ell$ з коефіцієнтом поглинання $\alpha(\ell)$ та температурою $T_{\text{атм}}$ має яскравісну температуру $dT_{\text{яат}} = \alpha(\ell)T_{\text{атм}}d\ell$. Якщо цей шар віддалений від місця прийому на відстань ℓ , то створюваний ним сигнал зменшується на шляху поширення відповідно до множника послаблення

$$K(\ell) = \exp[-\Gamma(\ell)],$$

де $\Gamma(\ell) = -\int_0^{\ell} \alpha(\ell)d\ell$ - інтегральний коефіцієнт послаблення або оптична товщина шару ℓ [3].

Отже, яскравісна температура стовпа атмосфери довжиною $L_{\text{атм}}$ визначається за виразом

$$T_{\text{яат}} = \int_0^{L_{\text{атм}}} \alpha(\ell) K(\ell) T_{\text{атм}}(\ell) d\ell.$$

З розрахунків випливає, що середня температура приблизно на 30° нижча температури атмосфери $T_{0_{\text{атм}}}$ біля поверхні Землі. Отже, відповідно маємо [2]

$$T_{\text{яат}} = (T_{0_{\text{атм}}} - 30^\circ)[1 - K(\ell)].$$

Яскравісна температура мінімальна в zenіті, тобто тоді, коли мінімальна довжина атмосферного випромінюючого стовпа.

Яскравісна температури залежить від частоти та має максимум на межі 25 ГГц, що зумовлено парами води.

Температура неба, що пов'язана з космічними шумами, пропорційна квадрату довжини хвилі $\lambda_{\text{в}}$ і може бути описана залежністю [2]

$$T_{\text{як}} = T_{0_{\text{атм}}} \lambda_{\text{в}}^2.$$

Тут спрощений розмірний коефіцієнт, який дорівнює одиниці, коли довжина хвилі вимірюється у метрах. У сантиметровому і більш короткохвильових діапазонах впливом космічних шумів можливо нехтувати, однак він може бути істотним вже на дециметрових хвилях. Унаслідок цього сумарна яскравісна температура неба, що зумовлена атмосферою та космічним випромінюванням, має мінімум у діапазоні 1, ..., 10 ГГц.

Можливість розрізняти тіла за інтенсивністю радіотеплового випромінювання залежить від різниці їх яскравісних температур $\Delta T_{\text{я}} = T_{\text{я1}} - T_{\text{я2}}$. Температура усіх об'єктів земної поверхні, що спостерігаються, приблизно однакова. Тому розходження інтенсивності сигналів радіотеплового випромінювання тіл зумовлено, головним чином, розходженням їх випромінювальної здатності. Якщо відсутні зовнішні випромінювання, то температурний контраст пропорційний різниці випромінювальних здатностей $\Delta T_{\text{я}} = T_{\text{т}}(\alpha_1 - \alpha_2)$.

Яскравісні температури та температурні контрасти випромінювання Землі та атмосфери знаходять, складаючи баланс температур, що визначають енергію електромагнітних коливань, які

випромінюються, відбиваються та розсіюються різними середовищами в напрямку до радіометра, з урахуванням згасання радіохвиль на шляху поширення [2].

3.2. Чутливість та дальність дії радіометра

Інтенсивність радіотеплового випромінювання, прийнятого, антеною, оцінюється антенною температурою, тобто температурою погодженого з антеною резистора, що дає таку ж потужність шумів, як і реальний об'єкт. Радіометр як радіотехнічний пристрій характеризується чутливістю, під якою розуміється його здатність розрізняти зміни антенної температури.

Розглянемо різні випадки виміру антенної температури [2].

1. Приймальна антена не ідеальна, антенний промінь займає тілесний кут Ω_a , тіло, що спостерігається, має яскравісну температуру $T_{яф}$ і не охоплює цілком приймальний пункт, однак його розміри перекривають тілесний кут Ω_a . Під час роботи на передавання частина потужності розсіюється за межами головного променя Ω_a . Відповідно до принципу взаємності потужність, що приймається в межах головного променя, зменшується в $1 - \beta_A = \text{КВП}$ разів (КВП – коефіцієнт використання поверхні, який для різних антен складає 0,3...0,7). Крім того, через бічні пелюстки на антену впливають сторонні випромінювання, інтенсивність яких характеризується середньою температурою $T_{яб}$. Тому антенна температура буде

$$T_a = T_{яф}(1 - \beta_A) + T_{яб}\beta_A$$

2. На фоні випромінювального середовища, що перекриває антенний промінь, спостерігається зосереджена ціль, яка має температуру $T_{яц}$ і займає тілесний кут $\Omega_{ц} = S_{ц}/R^2$, де $S_{ц}$ – площа цілі, R – відстань. Якщо кут $\Omega_{ц}$ дуже малий порівняно з головною пелюсткою діаграми спрямованості, то баланс температур можна представити рівнянням

$$T_a = T_{яф}КВП + T_{яц}КВП\Omega_{ц}/\Omega_a + T_{яб}\beta_A .$$

З урахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) антенно-фідерного тракту η_a

$$T_a = (T_{яф}КВП + T_{яц}КВП\Omega_{ц}/\Omega_a + T_{яб}\beta_A)\eta_a + T_{0A}(1 - \eta_a).$$

Через втрати прийнятий сигнал зменшується та виникає нове, внутрішнє джерело випромінювання з температурою навколишнього середовища T_{0A} і поглинаючою здатністю $1 - \eta_a$.

Контраст антенних температур двох поруч розташованих протяжних об'єктів з яскравісними температурами, що відрізняються на $\Delta T_{яф}$, буде

$$\Delta T_a = \Delta T_{яф}КВП\eta_a.$$

Під час спостереження малих цілей, коли корисний сигнал приймається не на всьому тілесному куті Ω_a , а лише його частиною $\Omega_{ц}$, що охоплює ціль, температурний контраст зменшується

$$\Delta T_a = \Delta T_{яф}КВП\eta_a \Omega_{ц}/\Omega_a$$

пропорційно відношенню кутів $\Omega_{ц}/\Omega_a$. Мале значення цього відношення, що має назву коефіцієнта заповнення антенного променя, є головною причиною послаблення температурного контрасту при спостереженні зосереджених цілей.

Вхідний сигнал приймача характеризується сумою антенної температури і температури внутрішніх шумів приймача $T_a + T_{ш}$. Вихідний ефект являє собою реалізацію випадкової величини, що є сумою великої кількості незалежних зразків n і розподілена за нормальним законом [2]. Оптимальна процедура обробки в приймачі радіотеплових сигналів полягає в накопиченні їх енергії. Якщо накопичення немає (смуга пропускання лінійної частини приймача та інтегратора однакові, $n=1$), то при лінійному детекторі середньоквадратична похибка виміру температури практично дорівнює самій вимірюваній величині – дисперсії флюктуації сигналу. Накопичення незалежних відліків зменшує середньоквадратичну похибку пропорційно кореню квадратному з їх кількості $\sigma_T \approx 1/\sqrt{n}$ [2]. У радіометрії незалежні зразки сигналу отримують розширенням смуги пропускання лінійної частини

приймача Δf порівняно зі смугою частот інтегратора ΔF , оскільки число незалежних зразків дорівнює відношенню зазначених смуг $n = \Delta f / \Delta F$ [3].

Відповідно до викладеного, для ідеального радіометра середньоквадратичне відхилення температури, що вимірюється від її середнього значення, дорівнює $\sigma_T = (T_a + T_{ш})\sqrt{\Delta F / \Delta f}$. Ця величина визначає мінімальну зміну антенної температури, що реєструється $\delta T_{a \min} = \sigma_T m_T$. Коефіцієнт m_T вибирається відповідно до необхідної імовірності розв'язання поставленої задачі.

Інше важливе джерело похибок – нестабільність посилення приймача – змушує застосовувати складні схеми радіометрів, у яких губиться деяка частина корисної потужності або виникає додаткове джерело шумів. Відповідне погіршення чутливості характеризують коефіцієнтом α_p , значення якого для різних схем змінюється в межах 1...3. Отже, з урахуванням усіх перелічених факторів чутливість радіометрів виражається за формулою

$$\delta T_{a \min} = m_T \alpha_p (T_a + T_{ш}) \sqrt{\Delta F / \Delta f}.$$

Задача, що вирішується радіометричною системою, вважається виконаною відповідно до тактичних вимог, якщо контраст антенних температур, що спостерігається ΔT_a , перевищує $\delta T_{a \min}$. Отже, зосереджена ціль площею $S_{ц}$ спостерігається за умови

$$\Delta T_a = \Delta T_{я} \text{КВП} \eta_a \Omega_{ц} / \Omega_a \geq m_T \alpha_p (T_a + T_{ш}) \sqrt{\Delta F / \Delta f}.$$

Тілесний кут цілі $\Omega_{ц}$ залежить від відстані R , а тілесний кут антенного променя виражається через реальну площу антени S_a . Тоді граничне значення відстані, при якому радіометрична система ще виконує поставлені завдання, визначається за виразом [2]

$$R_{\max} = \frac{\text{КВП}}{\lambda_b} \sqrt{\Delta T_{я} \eta_a S_a S_{ц} / (m_T \alpha_p (T_a + T_{ш})) \sqrt{\Delta f / \Delta F}}.$$

Як впливає з цього виразу, дальність дії радіометра можна підвищувати, збільшуючи розміри антени. При фіксованих розмірах антени істотний вплив дає конструкція антени, що визначає коефіцієнт використання поверхні. Бажано також зменшувати довжину хвилі (з урахуванням згасання радіохвиль в атмосфері) з

метою підвищення спрямованості антени та можливості використання більш широкосмугових приймачів. Специфічний шлях підвищення дальності дії радіометрів полягає у розширенні смуги пропускання лінійної частини приймального тракту та збільшенні часу накопичення сигналу, наскільки це припустимо умовами огляду з рухомої платформи.

3.3. Структурна схема радіометра

Основними вимогами до радіометрів, що визначають принципи їх побудови, є:

1. Робота в діапазоні радіочастот, у якому яскравість поверхні максимальна, а шуми джерел, що заважають, – мінімальні. Тому як робочий вибирають діапазон частот від 1 до 100 ГГц, для якого в даний час можливе створення малошумних приймачів і мінімальні перешкоди від космічного та інших видів паразитного випромінювання. Вибір конкретної робочої частоти визначається задачами радіометра.

2. Забезпечення високої просторової та поляризаційної селекції прийнятого випромінювання при широкому секторі огляду. Ця вимога визначає принципи побудови антенної системи радіометра. Вона повинна мати максимальну спрямованість, забезпечувати роздільний прийом горизонтально і вертикально поляризованого випромінювання, мати сканувальний пристрій для перекриття необхідної смуги огляду.

3. Висока чутливість і точність визначення як абсолютного значення T_j , так і контрасту температур ΔT_j різних ділянок поверхні на фоні шумової температури.

Як відмічалось раніше, оптимальний прийом радіотеплового сигналу зводиться до фільтрації коливання за допомогою смугового підсилювача, квадратичного детектування та некогерентного накопичення за час тривалості сигналу [2, 3].

На практиці найбільше застосування в радіометрах отримали супергетеродинні приймачі як більш надійні в роботі. Істотним недоліком супергетеродинного приймача є порівняно вузька смуга робочих частот, що зумовлена смугою пропускання підсилю-

вача проміжної частоти (10...60 МГц).

Підсилювачі високої частоти дозволяють покращити шумові характеристики приймача та розширити його смугу пропускання за високою частотою. Для цього використовують лампи біжучої хвилі (ЛБХ), параметричні підсилювачі та підсилювачі на тунельних діодах. Існуючі ЛБХ дециметрового та сантиметрового діапазонів забезпечують смугу пропускання 10...30% від несучої частоти при коефіцієнті підсилення за потужністю 20...30 дБ і шумовій температурі 1000...4000 К. Головні недоліки ЛБХ – значні габаритні розміри, маса і потужність, що споживається. Тому ЛБХ застосовують зазвичай лише в радіометрах, що встановлюють на літаках і вертольотах [2].

Останнім часом все частіше застосовують параметричні підсилювачі та підсилювачі на тунельних діодах, що мають величину власних шумів і габаритні розміри менші, ніж ЛБХ. Шумова температура параметричних підсилювачів трисантиметрового діапазону не перевищує 500 К при смузі пропускання до 4000 МГц, а коефіцієнт підсилення за потужністю складає 10...20 дБ. Смуга пропускання підсилювачів на тунельних діодах досягає 15% від несучої частоти при коефіцієнті підсилення за потужністю 10...20 дБ та шумовій температурі в кілька сотень градусів у діапазоні сантиметрових і міліметрових хвиль. Використання як тунельних діодів, так і параметричних пристроїв дозволяє реалізувати радіометричні приймачі з малими габаритними розмірами і масою, а також з незначним споживанням потужності джерел живлення, що важливо для бортової апаратури.

Особливістю приймального пристрою радіометра є те, що випадкові зміни його коефіцієнта підсилення можуть бути сприйняті, як зміна температури об'єкта, що спостерігається. Для зменшення цього шкідливого ефекту радіометри будують за модуляційною схемою (рис. 3.1). Модулятор підключає до входу приймача поперемінно сигнали від антени та шумового еталона. Отже, посилювана напруга модулюється з низькою частотою (від десятків герців до десятків кілогерців), глибина модуляції залежить від різниці прийнятого та еталонного сигналів. Ця низько-

частотна модуляція сигналу зберігається і після детектування [4].



Рис. 3.1

Період модуляції вибирають так, щоб коефіцієнт підсилення не мінявся за цей час. Оскільки фаза модуляції відома, то низькочастотний детектор роблять синхронним. Опорна напруга детектора формується синхронізатором, що керує роботою модулятора. На виході детектора виникає напруга, яка пропорційна різниці температур антени та еталона. Як інтегратор використовується фільтр низьких частот, що визначає смугу пропускання ΔF [2].

Зміна коефіцієнта підсилення приймача впливає як на корисний сигнал, так і на еталонну шумову температуру. Тому вихідний ефект синхронного детектора слабо залежить від нестабільності посилення в приймальному тракті.

У сучасних модуляційних радіометрах як модулятори часто використовують феритові циркулятори, принцип дії яких заснований на ефекті Фарадея – на явищі повороту площини поляриза

ції радіохвилі в подовжньому магнітному полі. Магнітне поле утворюється за допомогою котушки, намотаної на ділянці хвилеводу, усередині якого розташований феритовий стрижень. Переключення проводиться зміною напрямку струму в котушці. Елементи зв'язку з наступним високочастотним трактом розраховані на визначений вид поляризації хвилі, що передається.

Модуляційні схеми мають істотний недолік: половина енергії вхідного сигналу втрачається на проміжку часу, коли приймач підсилює шуми еталонного джерела, що при модуляції меандром удвічі знижує чутливість радіометра ($\alpha_p=2$). Ще більші втрати мають місце в системах із синусоїдальним законом модуляції ($\alpha_p=2,8$) [2].

Для встановлення однозначної відповідності між показаннями вимірювального пристрою і антенною температурою здійснюють калібрування приймача та антени радіометра. У цьому випадку до входу приймача безпосередньо в процесі вимірів періодично підключають джерело із заздалегідь відомою температурою та фіксують відповідні вихідні сигнали. Як еталон температури застосовують вмонтовані в антенно-хвилевідний тракт узгоджені навантаження, газорозрядні шумові генератори або спрямований опорний рупор, що приймає космічне випромінювання.

Контрольні питання

1. *Які задачі вирішують радіометричні системи? Чим визначається їх роздільна здатність?*
2. *Дайте визначення яскравісної температури. Чим вона відрізняється від ефективної яскравісної температури?*
3. *За яких умов можливе розділення об'єктів земної поверхні?*
4. *Чим визначається чутливість радіометра?*
5. *Від чого залежить дальність дії радіометра?*
6. *Принципи побудови радіометрів. Структурна схема радіометра модуляційного типу.*

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Манойлов В.П., Омельчук В.В., Опанюк В.В. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 384с.
2. Радіотехнічні системи дистанційного зондування./ М.Ф. Пічугін, О.В. Андреев, О.А. Горбуненко та ін.: Навчальний посібник. – Житомир: ЖВІРЕ, 2006. – 96 с.