

А.Г. Сорочан¹, О.І. Ільїн¹, О.В. Ільїна²

¹Національний авіаційний університет, Київ

²Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

АВІАЦІЙНИЙ РАДІОВИСОТОМІР МАЛИХ ВИСОТ ІЗ ЗОНДУВАЛЬНИМ ЧМ-СИГНАЛОМ, МОДУЛЬОВАНИМ ОДНОТОНАЛЬНИМ ГАРМОНІЧНИМ КОЛИВАННЯМ

Розглядаються методи вимірювання висоти, відзначаються їх переваги та недоліки. Особливу увагу приділено вимірювачу висоти із зондувальним ЧМ-сигналом, модульованим однотональним гармонічним коливанням. В основі методу лежить перетворення індексу модуляції зондувального сигналу у функціональну залежність від різниці просторової часової затримки та регульованої часової затримки опорного сигналу. Наведено структурну схему, що реалізує розглянутий метод. Отримано деякі характеристики вимірювача, наводяться результати моделювання.

Ключові слова: аеронавігація, авіація, радіолокація, радіовисотомір.

Вступ

Постановка проблеми. В умовах високої інтенсивності повітряного руху виконання безпечних та регулярних рейсів літальних апаратів потребує застосування великої кількості радіотехнічних пристроїв. У зв'язку зі зростаючою роллю автоматизації управління польотами, створення високоточних приладів вимірювання координат повітряних суден є актуальною задачею сучасної авіації. Одним з таких приладів є бортовий радіовисотомір.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1...9] розглядаються методи вимірювання висоти, схеми побудови радіовисотомірів, принципи їх роботи, зазначені переваги та недоліки. Вивчення зазначених публікацій вказує, що питання підвищення точності вимірювання малих висот розкрито недостатньо. Тому метою статті є викладення результатів досліджень авторів щодо можливості відомих методів вимірювання висоти та підвищення точності вимірювання авіаційним бортовим радіовисотоміром малих висот.

Виклад основного матеріалу

Принцип роботи радіовисотомірів засновано на властивості радіохвилі відбиватися від об'єктів та розповсюджуватися у просторі прямолінійно і з постійною швидкістю. При чисельному визначенні висоти проводиться фіксація моментів випромінювання зондуючого сигналу та прийому відбитого від цілі (землі) сигналу і порівняння часового інтервалу між цими подіями. Значення

цієї затримки може міститися в амплітуді, фазі та частоті сигналу радіолокаційної станції. Існує три методи вимірювання висоти, які засновані на визначенні часової затримки зондувального сигналу в просторі: амплітудний, частотний та фазовий. Амплітудний (імпульсний) метод вимірювання висоти базується на безпосередньому вимірюванні часу затримки відбитого радіоімпульсу відносно випроміненого [1, с. 63]. На рис. 1 показана структурна схема амплітудного (імпульсного) радіовисотоміра.

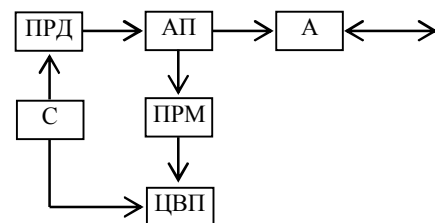


Рис. 1. Структурна схема амплітудного (імпульсного) радіовисотоміра.
Джерело: [2, с. 15].

На рис. 1 ПРД – передавач; АП – антенний перемикач; А – антена; С – синхронізатор; ПРМ – приймач; ЦВП – цифровий вимірювальний пристрій.

Синхронізатор одночасно запускає передавач та цифровий вимірювач затримки. Передавач формує періодичну послідовність радіоімпульсів прямокутної форми з необхідною амплітудою та потужністю. З виходу передавача ці імпульси через антенний перемикач подаються на вхід антени, відбувається випромінювання зондувальних сигналів у

простір. На час випромінювання приймач відключений від антени. По закінченню випромінювання радіоімпульсів антенний перемикач з'єднує антену з приймачем на час періоду слідування зондувальних імпульсів. Коливання передавача і відбитий від цілі сигнал з часом затримки надходять у приймач. Відбиті радіоімпульси мають значно меншу амплітуду, ніж сигнал передавача. Вимірювання часу затримки виконується у цифровому вимірювачі. Відстань до цілі D залежить від часу затримки t_z і визначається за наступною формулою [3, с. 17]:

$$D = \frac{c \times t_z}{2},$$

де $c \gg 3 \times 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість розповсюдження радіохвилі у вакуумі.

Оскільки у радіолокаційних станціях з імпульсним методом вимірювання висоти використовується лише одна антена, то у таких висотомірів є мінімальна відстань до цілі, яку вони спроможні виміряти (“мертва зона”) [3, с. 17]. Це явище пояснюється тим, що антенний перемикач від'єднує приймач від антени на час тривалості імпульсу.

По закінченню випромінювання зондувального сигналу перемикачу необхідний деякий час для відновлення своєї працездатності. Таким чином, мінімальна дальність до цілі, яку може виміряти імпульсний радіовисотомір дорівнює [3, с. 20]:

$$D_{\min} = 0,5c(t_i + t_{\text{відн}}),$$

де t_i – тривалість імпульсів, $t_{\text{відн}}$ – час відновлення чутливості приймача.

Для виміру великих висот використовуються імпульси великої тривалості, а для малих висот – імпульси малої тривалості.

До переваг імпульсного методу вимірювання висоти можна віднести роздільну здатність по дальності та необхідність у лише одній антені. Однак, велика мінімальна дальність, яка зумовлена тривалістю зондувальних імпульсів та часом перехідних процесів у антенному перемикачі, не дає змоги використовувати амплітудний радіовисотомір для малих висот.

Фазовий метод вимірювання висоти заснований на визначенні різниці фаз випроміненого та відбитого коливань [1, с. 67]. На рис. 2 зображена структурна схема фазового радіовисотоміра на якій: ФД – фазовий детектор; ГВЧ – генератор ВЧ; А1 – передавальна антена; А2 – приймальна антена; ПО – підсилювач-обмежувач; ВВН – вимірювач вихідної напруги.

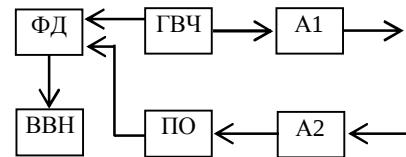


Рис. 2. Структурна схема фазового радіовисотоміра.

Джерело: [2, с. 20].

Генератор ВЧ виробляє незатухаючі коливання, які надходять на вхід передавальної антени. За допомогою передавальної антени відбувається випромінювання коливань у простір. Після відбиття від цілі сигнал надходить у приймальну антену, вихід якої з'єднано з підсилювачем-обмежувачем. З виходу підсилювача-обмежувача сигнал надходить на вхід фазового детектора. У фазовому детекторі порівнюються фази прийнятого та опорного сигналів. Різниця фаз між цими коливаннями пропорційна дальності до цілі і визначається таким співвідношенням [2, с. 20]:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} D - \varphi_{\text{від}} - \varphi_{\text{РЛС}},$$

де λ – довжина хвилі, $\varphi_{\text{від}}$ – фазовий зсув, який виникає при відбитті радіохвилі від цілі, $\varphi_{\text{РЛС}}$ – відомий фазовий зсув, який виникає у пристроях радіолокаційної станції.

До переваг фазового методу вимірювання висоти можна віднести малу необхідну потужність випромінювання і простоту структурної схеми. Значним недоліком є відсутність роздільної здатності.

Для вимірювання висоти в авіації широко використовується частотний метод, який базується на визначенні приросту частоти передавача за час розповсюдження зондувального сигналу від радіолокаційної стації до цілі і назад [3, с. 111]. Оскільки частотну модуляцію з неперервною зміною частоти реалізувати неможливо, то на практиці використовуються декілька видів періодичної модуляції частоти, наприклад: симетричний і несиметричний пілкоподібні закони, синусоїдальний закон. На рис. 3 зображена структурна схема частотного радіовисотоміра.

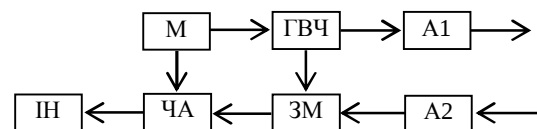


Рис. 3. Структурна схема частотного радіовисотоміра.

Джерело: [2, с. 17].

На рис. 3 М – модулятор; ГВЧ – генератор ВЧ; А1 – передавальна антена; А2 – приймальна антена; ЗМ – змішувач; ЧА – частотний аналізатор, ІН – індикатор.

Модулятор керує високочастотним генератором (генератор ВЧ), який виробляє коливання $f_H(t)$ з частотою, яка змінюється за періодичним законом (рис. 4, а), суцільна лінія). Коливання генератора ВЧ одночасно надходять на вхід передавальної антени і на перший вхід змішувача. Випромінений зондувальний сигнал відбивається від цілі і приймається приймальною антеною, вихід якої з'єднаний з другим входом змішувача. Частота відбитого сигналу $f_c(t)$ змінюється за законом випроміненого радіоімпульсу, але з затримкою t_z (рис. 4, а), штрихова лінія).

У результаті роботи змішувача на його виході сформується коливання з різницевою частотою F_δ , яка є пропорційною дальності до цілі. Ця частота визначається таким співвідношенням [3, с. 113]:

$$F_\delta = F_{\text{вип}} - F_{\text{від}} = \frac{4F_M D f_M}{c} D,$$

де F_M – частота модуляції, $D f_M$ – девіація частоти передавача.

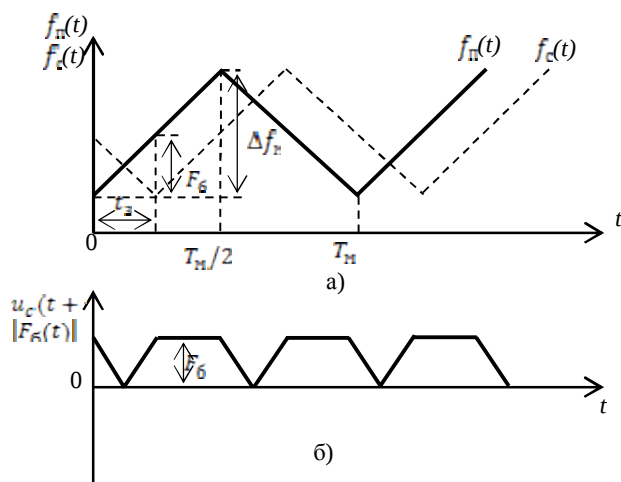


Рис. 4. Зміна частот випромінених та відбитих сигналів при симетричному пилкоподібному законі модуляції частоти (а) і зміна частоти биття (б).

Джерело: [1, с. 114].

З виходу змішувача коливання різницевої частоти надходить у частотний аналізатор. Дальність до цілі при частотному методі вимірювання характеризується такою рівністю [3, с. 113]:

$$D = \frac{c F_\delta}{4 F_M D f_M}.$$

Частотний метод можливо використовувати для вимірювання малих висот, однак, значним недоліком такого радіовисотоміра є необхідність у високій лінійності зміни частоти. Похибка вимірювання частотних бортових радіовисотомірів дорівнює 0,6 м, що є недостатньою [1, с. 66]. Звідси

впливає задача підвищення точності вимірювання висоти.

В даний час набув розвитку J-кореляційний метод вимірювання дальності [10, с. 94...102; 11, с. 43...35]. Структурна схема радіовисотоміру, що реалізує цей метод, наведена на рис.5.

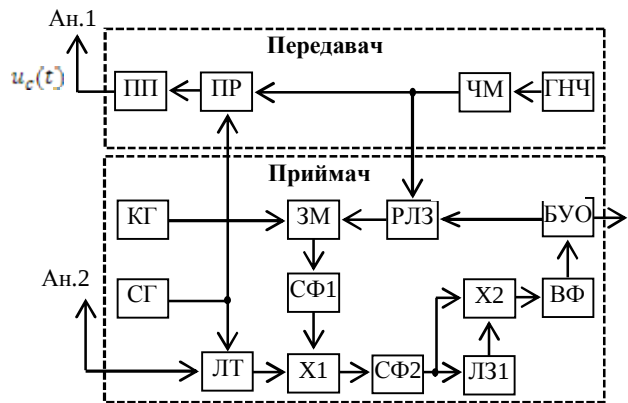


Рис. 5. Структурна схема радіовисотоміра.

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 5: Ан.1 – передавальна антена; Ан.2 – приймальна антена; ПП – підсилювач потужності; ПР – перетворювач частоти; ЧМ – частотний модулятор; ГНЧ – генератор низької частоти, який генерує гармонічне коливання з частотою W ; РЛЗ – регульована лінія затримки з часовою затримкою q_c ; КГ – кварцовий гетеродин з частотою генерації W_H ; ЗМ – змішувач; СГ – спільний гетеродин; ЛТ – лінійний тракт приймача; СФ1 та СФ2 – смугові фільтри; X1 та X2 – перемножувачі; ЛЗ1 – лінія затримки на постійну часу t_1 ; ВФ – вузькосмуговий фільтр; БУО – блок управління та обробки сигналу.

У пристрої, що розглядається, зондувальним сигналом є ЧМ-сигнал з модулюючим гармонічним коливанням частоти W . Воно формується на виході модулятора та має вигляд:

$$u_c(t) = U_{c0} \times \cos[w_c t + b \cos(Wt + j_0) + g_0],$$

де U_{c0} – амплітуда сигналу; w_c – несуча частота; b – індекс модуляції; j_0 – початкова фаза модулюючого коливання; g_0 – початкова фаза сформованого сигналу.

У передавачі сформований сигнал $u_c(t)$ перетворюється ПР до частоти $W_0 \gg w_c$, посилюється за потужністю в ПП і випромінюється в простір. У просторі сигнал відбивається від поверхні, отримує часову затримку t , повертається на вхід приймача і після перетворення на ЛТ, запишеться:

$$u_c(t+t) = U_c \cos[w_c(t+t) + b \cos(W(t+t) + j_0) + n_0] \times$$

де U_c – амплітуда відбитого сигналу; V_0 – початкова фаза опорного коливання.

З виходу ЛТ сигнал надходить на вхід першого перемножувача Х1, де перемножується з опорним коливанням, яке формується з вихідного сигналу модулятора за допомогою РЛЗ, КГ, ЗМ і смугового фільтра СФ1, у вигляді:

$$u_0(t) = U_0 \cos[(\omega_c - \omega_r)t + b \cos(Wt + q_c) + j_0] \times$$

де U_0 – амплітуда опорного коливання; V_1 – початкова фаза опорного коливання.

Перемноженням відбитого $u_c(t+t)$ та опорного $u_0(t)$ сигналів на виході смугового фільтра СФ2 із середньою частотою ω_r та заданою смугою виділяється сигнал:

$$u_1(t) = U_1 \cos[\omega_r t - b_1 \sin[W_0, 5W(t + q_c) + j_0] + \omega_c t - q_c + j_r]$$

де U_1 – амплітуда сигналу згортки; $b_1 = 2b \sin[0, 5W(t - q_c)]$ – знову сформований індекс модуляції; j_r – початкова фаза КГ.

Перетворений індекс модуляції залежить від різниці часових затримок, тобто від $Dt = t - q_c$. Зміна q_c веде до зміни різницевої часової затримки Dt , тобто до зміни індексу модуляції b_1 отже, до зміни ширини спектра сигналу. Різниця $(t - q_c)$ дорівнює нулю, коли в регульованій затримці значення $q_c = t$. У такому разі $b_1 = 0$.

Виділений СФ2 сигнал подається на вхід кореляційного детектора, що складається з перемножувача Х2, лінії затримки ЛЗ1 на постійну часу t_1 та вузькосмугового фільтра з середньою частотою W і смугою пропускання $DW < W$. В результаті на виході перемножувача Х2 в області низьких частот формується сигнал виду:

$$u_{21}(t) = U_2 \sum_{n=1}^5 j_n(b_2) \cos[mWt + 0, 5mW(t + q_c + t_1) + j_0]$$

де U_2 – амплітуда сигналу на виході кореляційного детектора; $b_2 = 2b_1 \sin(0, 5Wt_1)$ – новий індекс модуляції; n – порядок функції Бесселя; m – номер гармонічної складової в спектрі сигналу на виході перемножувача Х2.

Індекс модуляції у сформованому сигналі залежить від часової затримки t_1 , її вибирають із умови забезпечення рівності $b_2 = b_1$.

Спектр такого сигналу містить ряд гармонічних складових із частотами $mW, m = 1, 2, \dots$ кратними частоті Ω . Вузькосмуговий фільтр ВСФ виділяє гармонічну складову з частотою Ω , яка запишеться як:

$$u_2(t) = U_2 \sum_{n=1}^5 j_n(b_1) \cos[Wt + 0, 5W(t + q_j + t_1) + j_0].$$

Амплітуда цього сигналу

$$U_{вих}(b_1) = U_2 \sum_{n=1}^5 j_n(b_1) = U_2 \sum_{n=1}^5 j_n(2b \sin[0, 5W(t - q_c)])$$

визначає висоту положення літального об'єкта. Вихідна напруга $U_{вих}(b_1)$ подається в блок управління та обробки (БУО), однією з функцій якого є керування часовою затримкою q_c в лінії затримки РЛЗ. Зміною затримки q_c досягають рівності $U_{вих}(b_1) = 0$. Це можливо у разі виконання умови $(t - q_c) = 0$. Якщо зазначена умова виконується за деякого $q_c = q_0$, то просторова затримка, що визначається висотою, дорівнює $t = q_0$, а висота літального апарату визначається блоком БУО як $D = 0, 5c q_0$.

Отримана залежність вихідної напруги від різниці часових затримок $(t - q_c)$ є характеристикою вимірювача, вид якої визначається поведінкою суми функцій Бесселя. Для забезпечення однозначності вимірювань отримана залежність має бути монотонною. Аналіз залежності $\sum_{n=1}^5 j_n(b_1)$, проведений у [12, с. 957...969], показав, що дана залежність задовольняє умові монотонності, якщо індекс модуляції лежить у межах $0 < b_1 < 3,1$. У точці $b_1 = 0$, тобто при $q_c = t$, значення вихідної напруги дорівнює $u_{вих}(b_1) = 0$.

Важливим параметром будь-якого вимірювача є крутизна характеристики на околиці точки вимірювання, яка визначає точність вимірювання. Точкою вимірювання є значення при $b_1 = 0$. В околиці екстремальної точки залежність

$$U_{вих}(b_1) = U_2 \sum_{n=1}^5 j_n(b_1)$$

вироджується в лінійну залежність від частоти модуляції:

$$U_{вих}(0 < b_1 < 0, 5) = U_2 j_1[2b \sin[0, 5W(t - q_c)]] = 0, 5 U_2 b W(t - q_c).$$

З останнього виразу випливає, що крутизна визначається модулюючою частотою W , на яку немає обмежень. Крім цього, з викладених особливостей випливає, що ширина спектра, яка визначається індексом модуляції і модулюючою частотою буде істотно менше ширини спектра радіовисотоміра з пилкоподібним законом модуляції частоти.

Для підтвердження отриманих результатів у програмному середовищі System View було проведено моделювання радіовисотоміра з j -кореляційною обробкою сигналу з наступними параметрами зондувального сигналу: несуча частота сигналу на виході модулятора – 40 МГц, частоти модуляції – 70 кГц і 51 кГц. Проведені експерименти підтверджують адекватність процесів, що протікають у схемі, процесам, викладеним у роботі. На рис. 6 наведено характеристику вимірювача.

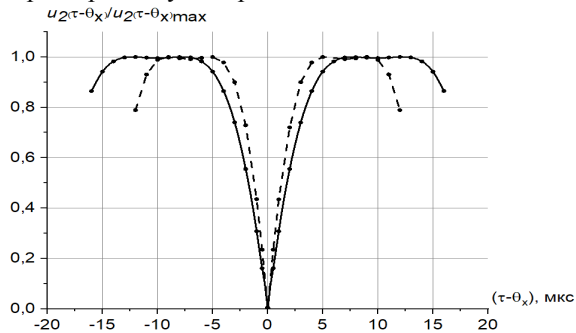


Рис. 6. Характеристика висотоміра: суцільна крива відповідає частоті модуляції $F = 50$ кГц, пунктирна крива – частоті модуляції $F = 70$ кГц.

Джерело: розроблено авторами.

З експериментальних характеристик випливає, що для частоти модуляції 70 кГц, максимальний інтервал монотонності характеристики $Dt = 10$ мкс, що відповідає максимальній висоті 1500 м. Для частоти модуляції 50 кГц максимальна висота вимірювання становить понад 1800 м. При цьому практична ширина спектра зондувального сигналу становить у першому випадку менше 0,8 МГц, у другому – менше 0,5 МГц, тобто зі збільшенням вимірюваної висоти необхідна ширина спектра зондувального сигналу зменшується.

Похибка радіовисотоміра з j -кореляційною обробкою сигналу визначається кроком дискретизації РЛЗ. Для кроку дискретизації

$$Dt_D = 1 \text{ нс} \text{ похибка складає } DD = \frac{c \times Dt_D}{2} = 0,15 \text{ м.}$$

Висновки

Проведено аналіз методів вимірювання висоти, відзначені їх переваги та недоліки. Аналіз показав, що в основу радіовисотоміра малих висот може бути покладено лише частотний метод вимірювання, проте точність вимірювання частотних радіовисотомірів є недостатньою.

Проведено аналіз j -кореляційного методу вимірювання висоти, запропонована структурна схема радіовисотоміра з кутовою модуляцією гармонічним коливанням. У програмному середовищі SystemView була побудована модель радіовисотоміра з j -кореляційною обробкою.

Проведені експерименти підтверджують адекватність процесів, що протікають у схемі, процесам, викладеним у роботі. За експериментальними даними була побудована характеристика вимірювача. Похибка вимірювання j -кореляційного радіовисотоміра менша, ніж похибка вимірювання частотних радіовисотомірів. Для кроку дискретизації $Dt_D = 1 \text{ нс}$ похибка

$$\text{складає } DD = \frac{c \times Dt_D}{2} = 0,15 \text{ м.}$$

Напрями подальших досліджень

В подальшому доцільно провести експериментальні дослідження запропонованого радіовисотоміра із зондувальним ЧМ-сигналом, модульованим однотональним гармонічним коливанням.

Список літератури

1. Зырянов Ю. Т. Основы радиотехнических систем / Ю. Т. Зырянов, О. А. Белоусов, П. А. Федюнин. – Тамбов: ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2011. – 147 с.
2. Васин В. В. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения) / В. В. Васин, О. В. Власов, В. В. Григорин-Рябов. – М.: Советское радио, 1970. – 690 с.
3. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации / М. И. Финкельштейн. – Москва: Радио и связь, 1983. – 536 с.
4. Коростелёв А.А. Теоретические основы радиолокации / [Коростелёв А.А., Клюев Н.Ф., Мельник Ю.А. та ін.]; под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
5. Жуковский А. П. Теоретические основы высотометрии / Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. – М.: Сов. радио, 1979 – 320 с.
6. Бакулев П. А. Радиолокационные системы / Пётр Александрович Бакулев, – М. : Радиотехника, 2004 – 320 с.
7. Берковиц Р.С. Современная радиолокация (анализ, расчёт и проектирование систем) / Рэймунд Берковиц ; [перевод с англ. под ред. Ю. Кобзарёва]. – М : Сов. радио, 1969. – 704 с.
8. Димова А. І. Радіотехнічні системи / Димова А. І., Альбац М. Е., Бонч-Бруєвич А. М – М.: Рад. радіо, 1975 – 440с.
9. Ланге Ф. Г. Статистические аспекты построения измерительных систем / Франц Генрих Ланге. – М.: Радио и связь, 1981. – 167 с.
10. Сорочан А. Г. Корреляционный радиодальномер / А.Г. Сорочан, Д.А. Добряк, Е.В. Заболотний // Вісник Національного технічного університету України "КПІ" / А.Г. Сорочан, Д.А. Добряк, Е.В. Заболотний., 2012. – (Радіотехніка. Радіоапаратобудування; вип. 49). – С. 94–102.
11. Ільїн О. І. Метод вимірювання дальності заснований на кореляційній обробці сигналу модульованого по частоті однотональним гармонічним коливанням / О.І. Ільїн // Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів "Радіoeлектроніка в XXI столітті" / О.І. Ільїн. – Київ, 2021. – С. 43–45.

12. Sorochan A.G., Kharchenko V.P. J-correlation direction finder with improved characteristics of a time delay meter / Telecommunications and Radio Engineering, 77(11):5-10 (2018)

Надійшла до редколегії 14.10.2022

Схвалена до друку 22.12.2022

Відомості про авторів

Сорочан Анатолій Григорович

доктор технічних наук доцент
професор
Національного авіаційного університету,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5023-8330>

Ільїн Олександр Ігорович

студент Національного авіаційного університету,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9025-8915>

Ільїна Олена Вікторівна

науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1172-0057>

Information about the authors

Anatolii Sorochan

Doctor of Technical Sciences Docent
Professor
of National Aviation University
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5023-8330>

Oleksandr Ilin

Student of National Aviation University
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9025-8915>

Olena Ilina

Researcher Associate
of State Research Institute of Aviation
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1172-0057>

LOW-RANGE AVIATION RADIO ALTIMETER WITH PROBING FM-SIGNAL MODULATED BY SINGLE TONE HARMONIC OSCILLATION

A. Sorochan, O. Ilin, O. Ilina

The article presents the methods of height measurement. The amplitude (pulse) method of height measurement is based on the direct measurement of the delay time of the reflected radio pulse relative to the emitted one. Advantages of the pulsed range measurement method include range resolution and the need for only one antenna. However, the long minimum range, which is caused by the duration of probing pulses and the time of transition processes in the antenna switch, does not allow the use of an amplitude radio altimeter for low altitudes. The phase method of height measurement is based on determining the phase difference of radiated and reflected oscillations. The advantages of the phase method of height measurement include the low required radiation power and the simplicity of the structural scheme. A significant disadvantage is the lack of resolution. The frequency method is based on determining the increase in the frequency of the transmitter during the propagation time of the sounding signal from the radar station to the target and back. The frequency method can be used to measure low altitudes, however, a significant disadvantage of such a radio altimeter is the need for high linearity of the frequency change. Special attention was paid to the height meter with an FM signal modulated by a single-tone harmonic oscillation. The basis of the method is the transformation of the modulation index of the sounding signal into a functional dependence on the difference between the spatial time delay and the adjustable time delay of the reference signal. The structural diagram that implements the considered method is presented. Some characteristics of the meter are obtained, and simulation results are given.

Keywords: aviation, aeronavigation, radiolocation, radioaltimeter.