

А.Г. Сорочан, д-р техн. наук, доцент, О.І. Львів
(Національний Авіаційний Університет, Україна)

Авіаційний висотомір із зондувальним сигналом, модульованим за частотою однотональним гармонічним коливанням

Розглядається вимірювач висоти із 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.

У авіації безпека польотів визначається низкою пристроїв, які забезпечують необхідні режими польоту. Одним з таких пристроїв є радіовисотомір.

Всі методи вимірювання відстані, засновані на визначенні часової затримки зондувального сигналу в просторі, це імпульсний, фазовий і частотний методи. Для вимірювання висоти в авіації широко використовується частотний метод. Основним недоліком такого методу є необхідність забезпечення високої лінійності зміни частоти. [1] В даний час набув розвитку J-кореляційний метод вимірювання дальності [2, 3]. Структурна схема радіовисотоміру, що реалізує цей метод, наведена на рис. 1

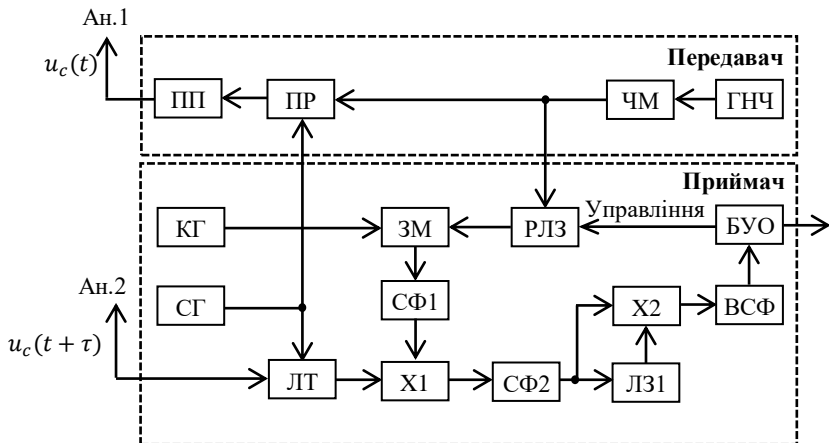


Рис. 1. Структурна схема радіовисотоміра

На рис. 1 Ан.2 – 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 Ω ; РЛЗ – регульована лінія затримки з часовою затримкою θ_x ; КГ – кварцовий гетеродин з частотою генерації ω_r ; ЗМ – змішувач; СГ – спільний гетеродин; ЛТ – лінійний тракт приймача; СФ1 та СФ2 – смугові фільтри; Х1 та Х2 – перемножувачі; ЛЗ1 – лінія затримки на постійну часу τ_1 ; ВСФ – вузькосмуговий фільтр; БУО – блок управління та обробки сигналу.

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

$$u_c(t) = U_{c0} \cdot \cos[w_c t + \beta \cos(\Omega t + \varphi_0) + \gamma_0], \quad (1)$$

де U_{c0} – амплітуда сигналу; w_c – несуча частота; β – індекс модуляції; φ_0 – початкова фаза модулюючого коливання; γ_0 – початкова фаза сформованого сигналу.

У передавачі сформований сигнал $u_c(t)$ перетворюється ПР до частоти $\omega_0 \gg w_c$, посилюється за потужністю в ПП і випромінюється в простір. У просторі сигнал відбивається від поверхні, отримує часову затримку τ , повертається на вхід приймача і після перетворення на ЛТ запишеться:

$$u_c(t + \tau) = U_c \cos[w_c(t + \tau) + \beta \cos(\Omega(t + \tau) + \varphi_0) + \gamma_0]. \quad (2)$$

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

$$u_0(t) = U_0 \cos[(w_c - w_r)t + \beta \cos(\Omega(t + \theta_x) + \varphi_0) + \gamma_1]. \quad (3)$$

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

$$u_1(t) = U_1 \cos[\omega_r t - \beta_1 \sin[\Omega t + 0,5\Omega(\tau + \theta_x) + \varphi_0] + \omega_c \tau - \theta_x + \varphi_r], \quad (4)$$

де $\beta_1 = 2\beta \sin[0,5\Omega(\tau - \theta_x)]$ – знову сформований індекс модуляції; φ_r – початкова фаза КГ.

Перетворений індекс модуляції залежить від різниці часових затримок, тобто від $\Delta\tau = \tau - \theta_x$. Зміна θ_x веде до зміни різницевої часової затримки $\Delta\tau$, тобто до зміни індексу модуляції β_1 , отже, до зміни ширини спектра сигналу. Різниця $(\tau - \theta_x)$ дорівнює нулю, коли в регульованій затримці значення $\theta_x = \tau$. У такому разі $\beta_1 = 0$.

Виділений СФ2 сигнал подається на вхід кореляційного детектора, що складається з перемножувача Х2, лінії затримки ЛЗ1 на постійну часу τ_1 і вузькосмугового фільтра з середньою частотою Ω і смугою пропускання $\Delta\Omega < \Omega$. В результаті на виході перемножувача Х2 в області низьких частот формується сигнал виду:

$$u_{21}(t) = U_2 \sum_{n,m=1}^5 J_n(\beta_2) \cos[m\Omega t + 0,5m\Omega(\tau + \theta_x + \tau_1) + \varphi_0], \quad (5)$$

де $\beta_2 = 2\beta_1 \sin(0,5\Omega\tau_1)$ – 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 τ_1 , її вибирають із умови забезпечення рівності $\beta_2 = \beta_1$.

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

$$u_2(t) = U_2 \sum_{n=1}^5 J_n(\beta_1) \cos[\Omega t + 0,5\Omega(\tau + \theta_x + \tau_1) + \varphi_0]. \quad (6)$$

Амплітуда цього сигналу

$$U_{\text{вих}}(\beta_1) = U_2 \sum_{n=1}^5 J_n(\beta_1) = U_2 \sum_{n=1}^5 J_n(2\beta \sin[0,5\Omega(\tau - \theta_x)]) \quad (7)$$

визначає висоту положення літального об'єкта. Вихідна напруга $U_{\text{вих}}(\beta_1)$ подається в блок управління та обробки (БУО), однісно з функцій якого є керування часовою затримкою θ_x в лінії затримки РЛЗ. Зміною затримки θ_x досягають рівності $U_{\text{вих}}(\beta_1) = 0$. Це можливо у разі виконання умови $(\tau - \theta_x) = 0$. Якщо зазначена умова виконується за деякого $\theta_x = \theta_0$, то просторова затримка, що визначається висотою, дорівнює $\tau = \theta_0$, а висота літального апарату визначається блоком БУО як $D = 0,5c\theta_0$.

Отримана залежність вихідної напруги від різниці часових затримок $(\tau - \theta_x)$ є характеристикою вимірювача, вид якої визначається поведінкою суми функцій Бесселя. Для забезпечення однозначності вимірювань отримана залежність має бути монотонною. Аналіз залежності $\sum_{n=1}^5 J_n(\beta_1)$, проведений у [4], показав, що дана залежність задовольняє умові монотонності, якщо індекс модуляції лежить у межах $0 < \beta_1 < 3,1$. У точці $\beta_1 = 0$, тобто при $\theta_x = \tau$, значення вихідної напруги дорівнює $U_{\text{вих}}(\beta_1) = 0$. Важливим параметром будь-якого вимірювача є крутизна характеристики на околиці точки вимірювання, яка визначає точність вимірювання. Точкою вимірювання є значення при $\beta_1 = 0$. В околиці екстремальної точки залежність

$$U_{\text{вих}}(\beta_1) = U_2 \sum_{n=1}^5 J_n(\beta_1) \quad (8)$$

вироджується в лінійну залежність від частоти модуляції:

$$U_{\text{вих}}(0 < \beta_1 < 0,5) = U_2 J_1\{2\beta \sin[0,5\Omega(\tau - \theta_x)]\} = 0,5U_2\beta\Omega(\tau - \theta_x), \quad (8)$$

З останнього виразу випливає, що крутизна визначається модулюючою частотою Ω , 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 51кГц. Проведені експерименти підтверджують адекватність процесів, що протікають у схемі, процесам, викладеним у роботі. На рис. 2 наведено характеристику вимірювача.

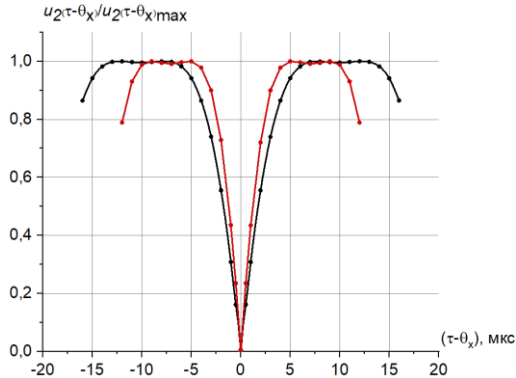


Рис. 2. Характеристика висотоміра: чорна крива відповідає частоті модуляції $F = 50$ кГц, червона крива – частоті модуляції $F = 70$ кГц

З експериментальних характеристик випливає, що для частоти модуляції 70 кГц, максимальний інтервал монотонності характеристики $\Delta\tau = 10$ 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 0,5МГц, тобто зі збільшенням вимірюваної висоти необхідна ширина спектра зондувального сигналу зменшується.

Список літератури

1. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации / М. И. Финкельштейн. – Москва: Радио и связь, 1983. – 536 с.
2. 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.
3. Льїн О. І. Метод вимірювання дальності заснований на кореляційній обробці сигналу модульованого по частоті однотональним гармонійним коливанням / О. І. Льїн // Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів та аспірантів «Радіоелектроніка в XXI столітті» / О. І. Льїн. – Київ, 2021. – С. 43–45.
4. Sorochan A.G., Kharchenko V.P. J-correlation direction finder with improved characteristics of a time delay meter / Telecommunications and Radio Engineering, 77(11):4-7 (2018).