

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Проведений аналіз існуючих способів вимірювання амплітуди антенних сигналів радіоприймальних пристроїв і визначена їх потенційна чутливість. Розглянутий новий високочутливий спосіб вимірювання амплітуди антенного сигналу, обмеженого одним періодом несучої частоти, в якому використовується електромагнітна система магнетик-провідник в режимі компенсації магнітного поля. Визначена потенційна чутливість вимірювання такого способу, розрахункове значення якої дорівнює 10^{-11} В, що на 4 десяткових порядки перевищує аналогічну величину існуючих способів вимірювання.

© О.Д. Бех, В.В. Чернецький,
В.В. Єлшанський, 2003

УДК 621.396

О.Д. БЕХ, В.В. ЧЕРНЕЦЬКИЙ, В.В. ЄЛШАНСЬКИЙ

ВИСОКОЧУТЛИВЕ ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ АНТЕННОГО СИГНАЛУ

Електромагнітне поле гармонічної форми, як встановлено експериментально, належить до сигналів, які при розповсюдженні в середовищах не змінюють часових параметрів, а набувають модуляцію інтенсивності поля. Амплітудна модуляція середовищем пропорційна його електропровідності і періоду гармонічного поля і не залежить від кількості періодів поля, що генеруються випромінювачем, тобто міжперіодна взаємодія відсутня.

Отже, вибираючи період гармонічного радіоімпульса, можна керувати затуханням радіоімпульса у вибраному середовищі, обмеженому його електропровідністю. Обмежуючи затухання і збільшуючи період, випромінювач переводять в режим зондування середовища ближнім полем, тобто таким, затримка якого у віддаленій точці менше періода зондуючого імпульса. Такий режим роботи випромінювача стає переважаючим при локації і зв'язку у воді та землі. Затухання амплітуди зондуючого імпульса при цьому обумовлюється діаграмою спрямованості антени, яка може бути розрахована за відомими методиками для довгохвильового зв'язку.

Якщо низькочастотне електромагнітне поле діє на віддалений від випромінювача об'єкт, що відрізняється параметрами питомої електропровідності або магнітної проникності, а протяжність його значно менша довжини хвилі, то в такому об'єкті збуджується електромагнітне поле у вигляді зондуючого імпульса. Якщо об'єкт має більшу магнітну проникність ніж середовище, то він генерує імпульс тієї ж полярності, що

і зондує об'єкт. Якщо об'єкт має більшу електричну провідність ніж середовище, то він генерує імпульс протилежної полярності ніж зондує об'єкт. Конкретний об'єкт в електромагнітному полі опромінення сам стає джерелом електромагнітного поля тієї ж форми.

Імпульси, що генеруються внаслідок взаємодії зондує об'єкта з об'єктом, сприймаються в області випромінювання зондує об'єкта як модуляція амплітуди поля, що випромінюється. Затухання відбитого об'єктом імпульса, незважаючи на те, що він взаємодіє з усім об'ємом речовини об'єкта, а не тільки з його поверхневим шаром, може збільшуватись пропорційно більш ніж четвертій ступені від відстані, як це приймається в наземній радіолокації. Тому дальність радіозв'язку і дальність виявлення об'єктів при радіолокації в провідних середовищах залежить від чутливості радіоприймальних пристроїв, а точніше, від способу досягнення високої чутливості шляхом вимірювання амплітуди антенного сигналу, обмеженого одним періодом несучої частоти.

Тому параметри ефективності радіолокації і радіозв'язку будуть обумовлені цифрою чутливості вимірювання амплітуди антенного сигналу ΔU_A , яка дорівнює мінімальній амплітуді сигналу на виході антени, що викликає появу одного кванта на виході аналого-цифрового перетворювача амплітуди антенного сигналу, або спрацювання іншого порогового пристрою, що забезпечує приріст інформації на 1 біт внаслідок дії ΔU_A .

Вимірювання амплітуди антенного сигналу сучасних радіоприймальних пристроїв основана на амплітудному підсиленні антенного сигналу, формуванні опорного сигналу і аналого-цифровому перетворенні амплітуди підсиленого антенного сигналу [1]. Таке вимірювання не дозволяє досягти високої чутливості через високий рівень шумів підсилення і обробки сигналів. Послідовність перетворень антенного сигналу забезпечує спрацювання порогового пристрою від мінімальної амплітуди антенного сигналу

$$\Delta U_A \cdot K_n = U_0, \quad (1)$$

де K_n - коефіцієнт перетворення амплітуди ΔU_A в сигнал на виході РПУ, який забезпечує надійне переключення вирішуючого пристрою, що характеризується пороговою напругою U_0 . Щоб мінімізувати величину ΔU_A , необхідно збільшити K_n або зменшити U_0 . Можливості зменшення величини U_0 практично відсутні, тому що U_0 є порогом переключення логічного елемента обчислювальної техніки, де можливості зменшення U_0 вичерпані. Величина U_0 обумовлена властивостями нелінійної залежності струму від керуючої напруги транзисторів. З переходом від германієвих транзисторів ($U_0=0,3B$) до кремнієвих ($U_0=0,6B$) величина U_0 не зменшилась, а збільшилась майже вдвічі. Не вирішує проблеми і застосування тунельних діодів. Зважаючи на це, зменшення ΔU_A у відповідності до (1) досягається вибором $K_n \gg 1$, тобто підсиленням ΔU_A .

Всі відомі підсилювачі напруги потенціального поля поряд з підсиленням створюють адитивний шум $U_{шA}$. Тому рівняння (1) має вигляд

$$(\Delta U_A + U_{шA}) \cdot K_n = U_0. \quad (2)$$

Підсилювач повинен виконувати функцію зменшення амплітуди і дисперсії амплітуди шуму як вірогідної величини. У цьому випадку приймають

$$\Delta U_A = U_{шA}. \quad (3)$$

Таким чином, потенційна чутливість виявляється величиною, обумовленою існуючою напівпровідниковою технологією виготовлення функціональних елементів обробки сигналів: підсилювачів, компараторів, інтеграторів, перемножувачів та інших, тому що тільки ці елементи використовуються для обробки сигналу ΔU_A .

Всі операції обробки амплітудно модульованого сигналу виконують як перетворення форми потенціального електричного поля, інтенсивність якого змінюється в часі. Шуми підсилення додаються до амплітуди антенного сигналу і запам'ятовуються. Операція перетворення амплітудного значення суміші сигналу і шуму є лінійною, тому чутливість вимірювання обумовлюється рівнем шуму підсилення і обробки сигналів. Розгортуюче перетворення амплітудних значень антенного сигналу не збільшує чутливості. Практично досягнута чутливість вимірювання амплітуди антенних сигналів дорівнює $10^{-7}V$.

Підвищення чутливості вимірювання може бути досягнуто внаслідок такої послідовності операцій: перетворення амплітудно модульованого антенного сигналу в підсилений аналоговий сигнал; перетворення його в змінний струм гармонічної форми і дії його на контур антенного сигналу електромагнітної системи магнетик-провідник; формування опорного сигналу і дії його е.р.с. на контур опорного сигналу електромагнітної системи; забезпечення взаємодії опорного сигналу з антенним через дію магнітного потоку контура антенного сигналу на магнітний потік контура опорного сигналу електромагнітної системи; компенсації е.р.с. самоіндукції в контурі опорного сигналу шляхом віднімання магнітних потоків в магнетику, створених струмом і потоком вихрового електричного поля; перетворення струму антенного сигналу в е.р.с. індукції в контурі опорного сигналу; формування інформаційного параметра у вигляді фазового зсуву струму в контурі опорного сигналу щодо е.р.с. опорного сигналу; перетворення фазового зсуву в часовий інтервал, початок і кінець якого задаються зміною полярності відповідно е.р.с. опорного сигналу і струму в контурі опорного сигналу; квантування часового інтервалу і перетворення його в цифрове значення, по якому визначають амплітуду антенного сигналу.

Електромагнітна система магнетик-провідник на відміну від інших електромагнітних систем являє собою два суміщених кругових багатовиткових провідники зі струмом, в якій всі магнітні силові лінії, створені струмом, замкнені магнетиком, а кругові провідники мають мінімальний радіус, причому на один з провідників електромагнітної системи діють струмом антенного сигналу і утворюють контур антенного сигналу, а на другий – е.р.с. опорного сигналу і утворюють контур опорного сигналу електромагнітної системи.

Використання властивості електромагнітної системи в режимі компенсації магнітного поля опорного сигналу створювати фазовий зсув, пропорційний амплі-

літуді магнітного потоку антенного сигналу, дозволяє значно підвищити чутливість способу вимірювання [2].

Вимірювання інтервалу часу, початок якого задається зміною полярності опорного сигналу, а кінець – зміною полярності струму, який затримується антенним сигналом, дає змогу скористатися відомими методами підвищення точності вимірювання часового інтервалу, початок і кінець якого задається оптимальним способом.

Явище компенсації магнітних потоків в електромагнітній системі магнетик-провідник створюється взаємодією магнітного вихрового поля в магнетик, яке генерується струмом провідності, і магнітного вихрового поля, яке генерується потоком вихрового електричного поля провідника. Потік вихрового електричного поля у відповідності з першим рівнянням Максвелла називають "струмом зміщення".

Компенсація е.р.с. самоіндукції викликає явище компенсації магнітного потоку в електромагнітній системі магнетик-провідник, яке аналогічне явищу надпровідності в провідниках. У цьому випадку компенсується електричне поле зовнішнього джерела або індукована е.р.с. вихровим електричним полем, яке індукується зовнішнім магнітним полем провідника.

Розглянемо процес компенсації магнітного поля на інтервалі часу одного періоду дії е.р.с. на провідник. Для цього форми електричного і магнітного полів, які діють в провідниках і магнетиках, слід вважати статичними або квазістатичними, тобто такими, які проникають на всю глибину провідників і магнетиків.

Рівняння Максвелла оперують з трьома формами електричних полів: електричним потенціальним полем заряду E_ϕ , вихровим електричним полем E_r , що індукується магнітним полем, і однорідним електричним полем E_+ , а також двома формами магнітного поля: вихровим магнітним полем H_r і однорідним магнітним полем H_+ . Потенціальне магнітне поле H_ϕ , яке характеризується магнітними силовими лініями, що розходяться, добре відоме практично як поле постійних магнітів та соленоїдів. Отже, з теорії і практики відомо 6 форм електромагнітного поля, коливання яких можливі в просторі.

Джерела потенціальних і вихрових полів утворюють силову взаємодію. Взаємодія джерел потенціальних електричних і магнітних полів характеризуються скалярним потенціалом. Силова взаємодія джерел вихрових електричних і магнітних полів відбувається в напрямку векторного потенціалу. Просторові області рівномірного поля не взаємодіють.

Встановлено, що провідники взаємодіють з магнетиками своїми вихровими електричними полями, векторні потенціали яких спрямовані перпендикулярно до поверхні магнетика і провідника.

На контур антенного сигналу електромагнітної системи діє генератор струму

$$I_s = K_i e_A, \quad (4)$$

де K_i – коефіцієнт перетворення в струм антенного сигналу,

$$e_A = U_{mA} \cos \omega t .$$

Тому генератор струму створює сигнал

$$I_s = K_i U_{mA} \cos \omega t . \quad (5)$$

На контур опорного сигналу діє генератор напруги у вигляді е.р.с. опорного сигналу

$$e_0 = U_{m0} \cos \omega t . \quad (6)$$

Рівняння фазового перетворення сигналів e_A і e_0 електромагнітної системи в режимі фазового резонансу, який полягає в тому, що магнітний потік, створений опорним сигналом, $\Phi_0=0$, має вигляд

$$e_0 - W \frac{d\Phi(I_s)}{dt} = I_0 R . \quad (7)$$

Використовуючи метод комплексних амплітуд для зображення рівняння (7), одержимо

$$e_0 = I_0 R + j\omega W \Phi(I_s) . \quad (8)$$

У відповідності із законом повного струму Ампера

$$\Phi(I_s) = \frac{I_s W}{R_\mu} , \quad (9)$$

де R_μ – магнітний опір магнітопроводу.

З урахуванням (9) маємо

$$e_0 = I_0 R + j\omega L I_s , \quad (10)$$

де індуктивність магнітопроводу

$$L = \frac{W^2}{R_\mu} .$$

Фазовий зсув струму I_0 відповідно (10)

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L I_{sm}}{I_{0m} R} . \quad (11)$$

Приймаючи до уваги (5) і (6) за умови, що

$$\varphi = \frac{\omega L K_i U_{mA}}{e_0} , \quad (12)$$

крутизна перетворення антенного сигналу

$$S = \frac{\Delta\varphi}{\Delta U_{mA}} , \quad (13)$$

а

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t , \quad (14)$$

при $\omega = \omega_0$, одержимо чутливість перетворення антенного сигналу

$$\Delta U_{mA} = \frac{e_0 \Delta t}{L_i K_i} \quad (15)$$

Дія опорного сигналу I_s на електромагнітну систему описується рівнянням Кірхгофа:

$$e_0 = U_{mR} + j\omega W \Phi_{mHr(A)}, \quad (16)$$

де U_{mR} – амплітуда напруги на активному опорі контура опорного сигналу; $\Phi_{mHr(A)}$ – вихровий потік, створений струмом Ампера. Вважаючи напругу на індуктивності $U_{mL} \ll U_{mR}$, із (13) знайдемо магнітний потік

$$\Phi_{mHr(A)} = \frac{e_0}{j\omega W} \quad (17)$$

Е.р.с. опорного сигналу e_0 , напруга в контурі опорного сигналу U_{m0} і магнітний потік зображені на рисунку (поз. а, б, в).

Відповідно до другого закону Максвелла поява магнітного потоку в магнетик викликає феномен появи вихрового електричного поля E_{mr} , що охоплює магнетик,

$$\oint_L E_{mr} de = \frac{\omega}{j} \Phi_{mHr(A)}, \quad (18)$$

або враховуючи кількість витків і вводячи поняття електромагнітної сили вихрового поля,

$$\mathcal{E}_{mEr} = W \frac{\omega}{j} \Phi_{mHr(A)}. \quad (19)$$

Поле E_{mr} , створене магнетиком, є наслідком кутової поляризації електронів магнетика. Воно орієнтує електрони провідника в напрямку векторного потенціалу і створює потік електричного вихрового поля (рисунок, поз. г):

$$\Phi_{mEr} = \frac{\mathcal{E}_{mEr}}{R_\varepsilon}, \quad (20)$$

де R_s – опір провідника вихрового поля.

$$R_\varepsilon = \frac{I_E}{\varepsilon_{cr} S_E},$$

ε_{cr} – абсолютна електрична проникність провідника у вихровому електричному полі.

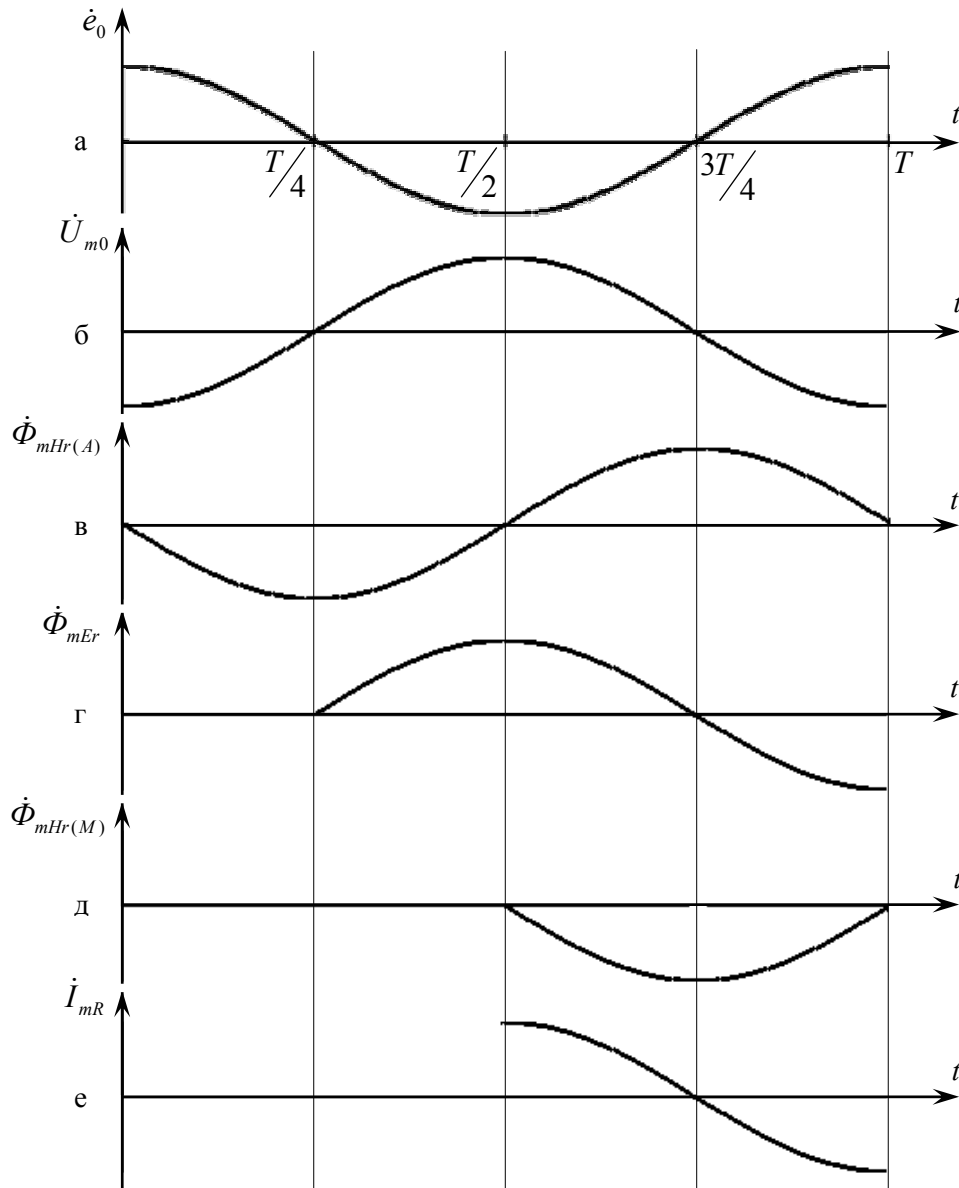
Потік Φ_{mEr} у провіднику аналогічно струму створює магнітний потік у магнетик. У феноменологічних рівняннях Максвелла потік вихрового електричного поля в провіднику інтерпретується як "струм зміщення".

Магнітна е.р.с. "струму зміщення"

$$\mathcal{E}_{mHr} = H_m I_E \quad (21)$$

зв'язана з потоком вихрового електричного поля в провіднику Φ_{mEr} рівнянням

$$\mathcal{E}_{mHr} = \frac{\omega W}{j} \Phi_{mEr} \cdot \quad (22)$$



РИСУНОК

Під дією \mathcal{E}_{Hr} в магнетику створюється потік індукованого магнітного поля:

$$\Phi_{mHr(M)} = \frac{\omega W}{jR_m} \Phi_{mEr} \quad (23)$$

У рівнянні (23) індекс (М) означає: індукований потік вихрового електричного поля є потоком, на який вперше звернув увагу Максвелл. Підставимо значення Φ_{mEr} (20) в (23) і одержимо (рисунок, поз. д)

$$\Phi_{mHr(M)} = -\frac{\omega^2 W^2}{R_\varepsilon R_\mu} \Phi_{mHr(A)} \quad (24)$$

Із рівняння (24) видно, що магнітний вихровий потік Максвелла направлений зустрічно до магнітного вихрового потоку Ампера і тому може компенсувати його. Результуючий сумарний потік в магнетику

$$\Phi_{m\varepsilon} = \Phi_{mHr(A)} + \Phi_{mHr(M)} = \Phi_{mHr(A)} \left(1 - \frac{\omega^2 W^2}{R_\varepsilon R_\mu} \right) \quad (25)$$

Частоту, на якій $\Phi_{m\varepsilon}=0$, називають частотою резонансу

$$\omega_0 = \frac{1}{W} \sqrt{R_\varepsilon R_\mu} \quad (26)$$

На частоті ω_0 струм визначається тільки активним опором ланцюга.

Компенсація магнітного потоку струму Ампера $\Phi_{mHr(A)}$ (див. рисунок "струмом" Максвелла $\Phi_{mHr(M)}$ (рисунок, поз. д) настає на інтервалі часу від $T/2$ до T . Це викликає появу струму в провіднику I_{mR} , який збігається по фазі з напругою U_{m0} (рисунок, поз. е). Отже, явище компенсації магнітних потоків у магнітопроводі відбувається при тривалості антенного сигналу, що дорівнює одному періоду T . Як видно із рисунка, на інтервалі часу $0 - T/4$ відбувається перетворення енергії зовнішнього джерела е.р.с. e_0 в енергію магнітного поля магнетика. На інтервалі часу $T/4 - T/2$ енергія магнітного поля магнетика перетворюється в енергію вихрового електричного поля провідника. Починаючи з другого півперіоду відбувається процес компенсації "струмом" Максвелла вихрового магнітного поля магнетика, а енергія вихрового електричного поля провідника перетворюється в енергію електричного потенціального поля провідника у вигляді струму I_{mR} . Цей процес закінчується в кінці періоду T .

Чутливість такого вимірювання амплітуди антенного сигналу на кілька порядків вище порівняно з існуючими приймачами антенних сигналів. Останнє підтверджується розрахунками чутливості по формулі (15). Розрахункове значення індуктивності L_i електромагнітної системи магнетик-провідник на броньовому феромагнітному магнітопроводі Б48 М2000НМ при коефіцієнті заповнення провідників 0,5 ($W=5000$ провід діаметром 0,1) по методиці [3] дорівнює 500 Гн. При амплітуді опорного сигналу $e_0=5$ В, коефіцієнті перетворення антенного сигналу в струм $K_i=100$ і частоті квантування 10 МГц

($\Delta t=10^{-7}$ с) розрахункова чутливість способу така:

$$\Delta U_{mA} = \frac{e_0 \Delta t}{L_i K_i} = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{500 \cdot 100} = 10^{-11} B.$$

Ця величина на чотири порядки перевищує практично досягнуті цифри чутливості відомих методів вимірювання.

Описаний спосіб вимірювання антенного сигналу може бути реалізований для локації труб нафто- та газопроводів. Локація труб необхідна для вимірювання глибини і контролю напрямку їх прокладки. На пристрої над трубопроводами розташовують передаючу і приймальні антени. Відбитий від трубопроводу зондуючий гармонічний сигнал реєструється приймальною антеною, після чого він підсилюється, перетворюється в струм і поступає в один провідник електромагнітної системи магнетик-провідник, в другий провідник якої поступає опорний сигнал. В цій електромагнітній системі такі сигнали перетворюються в фазорізниці з подальшим перетворенням в цифрове значення амплітуди антенного сигналу. За цифровими значеннями амплітуди антенного сигналу на ПЕОМ обчислюють глибину і відхилення від траєкторії прокладки трубопроводу.

1. *Проектирование радиолокационных приемных устройств*: Учеб. пособие для вузов / А.П. Голубков, А.А. Долматов, А.П. Лукашкин и др. – М.: Высш. шк., 1984. – 335 с.
2. *Бех О.Д., Чернецький В.В.* Високочутливий індуктивний спосіб вимірювання малих переміщень // Нові комп'ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі: Зб. наук. праць в 2 т. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2001. – Т.1. – С. 14 - 19.
3. *Расчет индуктивностей*: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоиздат, 1986. – 488 с.

Отримано 15. 06. 2003