

Рыжевская и др.

5. Горященко К.Л. Вимірювач кута фазових зсувів за методом коінциденції / К.Л. Горященко, І.В. Гула // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, радіоапаратобудування. – К. : КПІ. – №54.

References

1. Piatin S.I., Trotsyshyn I.V. Metody ta zasoby vymiriuvannya fazovykh zsuviv : "Podillia", 1996 -159s.
2. A.A Bohorodyskyi, A.H. Ryzhevskiyi Nonyusnue analohovo-tsyfrovue preobrazovately. M., "Enerhyia", 1975.
3. P. P. Ornatskyi. Avtomatycheskye yzmereniya u pryboru (analohovue y tsyfrovue) 5-e yzd., pererab. y dop./— K.; Vyshchashk. Holovnoe yzd-vo, 1986.—604 s.
4. Tsyfrovoyi fazometr. A.S. № 310191 (SSSR). Opubl. v biul. "Otkrutyia. Yzobreteniya. Promushlennue obraztsu. Tovarnue znaky", 1971, №23. Avt.: A.A Bohorodyskyi, A.H. Ryzhevskiyi, T.N. Ryzhevskaya i dr.
5. Horiashchenko K.L., Hula I.V. Vymiriuvach kuta fazovykh zsuviv za metodom kointsedentsii/. - Kyiv - vyd-vo KPI. - №54.

Надійшла до редакції
9.6.2013 р.

УДК 621.396.96

В.Р. ЛЮБЧИК; О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ; М.В. ГОЛОВАТИЙ

Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ТА ДАЛЬНОСТЕЙ ОБ'ЄКТІВ БАГАТОЧАСТОТНИМ ФАЗОВИМ МЕТОДОМ

В роботі розглядаються питання визначення радіальної швидкості рухомих об'єктів, а також їх дальностей. Запропоновано використання багато частотного фазового методу вимірювання шляхом зондування об'єктів сигналами з прямокутною обвідною спектру в радіодіапазоні. Встановлено що для визначення дальностей об'єктів необхідно перетворювати зондуючий сигнал в область радіочастот методами амплітудної чи балансної модуляції, а для визначення радіальної швидкості за допомогою односмугової модуляції.

Ключові слова: доплерівський зсув частот, радіальна швидкість об'єктів, дальність, спектр, фаза, амплітуда.

V.R. LIUBCHUK; O.K. YANOVYTSKYI, M.HOLOVATYI

Khmelnitsky National University, Ukraine

DETERMINATION OF RADIAL VELOCITY AND DISTANCE OBJECTS BY MULTIFREQUENCY PHASE METHOD

Abstract - This paper deals with the determination of the radial velocity of moving objects and their distances. The use of many frequency phase measuring method by sensing objects with rectangular signals bypass the radio spectrum. Found that for determining distances of objects to convert the probe signal in frequency domain methods amplitude modulation, or balancing, and to determine the radial velocity by one-way modulation.

The analysis of different methods of reducing crest-factor signal by mathematical modeling and graphical output of results for the analysis clearly shows the particular use, their features and benefits. Based on this analysis, we can construct the following steps of achievement data, their adaptation and improvement, to be used for data transmission channels. Examining allow us, the number of harmonics of the signal is the first indicator of where we are starting the experiments, because the work is aimed at determining the overall solution algorithm for an arbitrary number of harmonics. After first examining the results for a set number of harmonics, you can find a common output behavior.

Keywords: Doppler shift, the radial velocity of objects, range, spectrum, phase, amplitude.

Вивчення стану питання. При радіолокаційному дослідженні об'єктів необхідно визначити чотири основних параметра, а саме: дальність об'єкта r_x , азимут α_x , кут місця β_x та радіальну швидкість v_x . [1, 2] Серед цих характеристик об'єкта два, як правило, визначаються прямими методами - дальність та радіальна швидкість. Інші два непрямим методами - азимут та кут місця. Так для визначення дальності вимірюють часову затримку, зміну фази або зміну частоти зондуючого сигналу. При визначенні радіальної швидкості визначають доплерівський зсув частоти. Вимірювання азимута та кута місця визначають по напрямку антени радіолокатора. При застосуванні різницевого, дальномірного або інших подібних методів, вимірюють дальності до об'єкта від різних радіолокаційних станцій, і напрями визначають по точках перетину ліній місця об'єкту. Отже найбільш важливими характеристиками об'єкту які вимірюють прямими методами і потребують забезпечення високоточного визначення є дальність та радіальна швидкість об'єкта.

Найбільш розповсюдженими методами визначення дальності об'єкта та його радіальної швидкості є імпульсний метод. Цей метод полягає у вимірюванні відстані за часовою затримкою зондуючого імпульсу, а радіальну швидкість по доплерівському зсуву частоти радіочастотного заповнення зондуючого імпульсу. [1, 2] Даний підхід передбачає наявність протиріччя. Для підвищення точності вимірювання відстаней необхідно зменшувати тривалість зондуючого імпульсу, а для підвищення точності вимірювання радіальної швидкості необхідно збільшувати тривалість зондуючого імпульсу. Отже неможливо одночасно

підвищувати точність та розрізнявальну спроможність по дальності та радіальній швидкості.

Інший підхід який дозволяє вимірювати дальність та радіальну швидкість є застосування як зондуючі надширокопasmових сигналів. [2] Їх застосування дозволяє вимірювати дальності з високою точністю, а радіальна швидкість визначається як зміна дальності за одиницю часу. Отже, даний підхід вимагає застосування сигналів із значним частотним діапазоном, що створює складності при технічній реалізації генераторів, антенних систем, пристроїв реєстрації, обробки сигналів тощо.

В роботах [3-6] наведені дослідження багаточастотних фазових методів вимірювання дальностей до багатьох об'єктів, які мають високу точність та розрізнявальну спроможність при застосуванні зондуючих сигналів з обмеженим частотним діапазоном. Проте ці методи на дозволяють вимірювати радіальну швидкість об'єктів. Тому необхідно дослідити можливості застосування фазових багаточастотних методів вимірювання для знаходження доплеровського зсуву частоти.

Основна частина. Доплерівський зсув частоти проявляється як зміщення частоти гармонійного зондуючого сигналу відбитого від об'єкту який рухається. Цей зсув залежить від частоти носійного сигналу f_0 , радіальної швидкості та швидкості розповсюдження хвилі в середовищі, для електромагнітних хвиль швидкість світла c :

$$f_d = \pm \frac{v_x}{c} f_0. \quad (1)$$

Багаточастотний фазовий метод передбачає зондування об'єктів вузькопasmовим сигналом з прямокутною обвідною спектру. Такій сигнал складається з набору спектральних складових, кількість яких в два рази більша за кількість об'єктів характеристики яких потрібно визначати. Для проведення радіолокаційних досліджень спектр такого сигналу переносять в радіочастотний діапазон методами амплітудної модуляції. В такому разі доплеровського зсуву набувають усі гармонійні складові пропорційно до їх частот:

$$f_{di} = \pm \frac{v_x}{c} (f_0 \pm f_i). \quad (2)$$

де $f_0 \pm f_i$ - спектральна частота гармонік амплітудо-модульованого групового зондуючого сигналу. Тому як доплеровський зсув має односпрямований характер (від'ємний при віддаленні об'єкта та додатний при наближенні) для подальших досліджень обираємо знак «+» для спрощення математичних викладок. Для від'ємного зсуву необхідно буде замінити знак на протилежний.

Як слідує з виразу (2), чим більша спектральна частота тим більший доплеровський зсув частоти. Але тому як $v_x \ll c$, то різниця між доплеровськими зсувами різних гармонік незначна і можна вважати що $f_{di} \approx f_{di+1}$. Тому як зондуючий радіосигнал представляє собою суму гармонік, то при відбитті від рухомого об'єкту кожна гармоніка набуває доплеровського зсуву. Із врахуванням умови рівності доплеровського зсуву для усіх гармонік частоти спектральних складових будуть наступними:

$$f_0 + f_d, f_0 \pm f_1 + f_d, f_0 \pm f_2 + f_d, \dots, f_0 \pm f_i + f_d \dots \quad (3)$$

В залежності від дальності об'єкту усі гармоніки набувають певного фазового зсуву пропорційного дальності та обернено пропорційні довжині хвилі. Таким чином сумарний сигнал відбитий від одного об'єкту буде представляти собою суму гармонійних складових із доплеровським зсувом частоти та фазовими зсувами кожної гармоніки:

$$s_2(t) = A_0 \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_d)t - \varphi_0) + \sum_{i=1}^n A_{i+} \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_i + f_d)t - \varphi_{+i}) + \sum_{i=1}^n A_{i-} \cdot \cos(2\pi(f_0 - f_i + f_d)t - \varphi_{-i}). \quad (4)$$

Як видно з виразу (4) сумарний відбитий сигнал має три складові носійну частоту, верхню бічну смугу та нижню бічну смугу. Як було визначено вище, фазовий зсув кожної гармонійної складової залежить від відстані та довжини хвилі. Враховуючи що довжина хвилі залежить від частоти та швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі, можна записати:

$$\varphi_i = 4\pi \frac{r}{c} (f_0 \pm f_i + f_d) \quad (5)$$

В такому разі вираз (4) із врахуванням (5) можна записати наступним чином:

$$s_2(t) = A_0 \cdot \cos\left(2\pi(f_0 + f_d)t - 4\pi \frac{r}{c} (f_0 + f_d)\right) + \sum_{i=1}^n A_{i+} \cdot \cos\left(2\pi(f_0 + f_i + f_d)t - 4\pi \frac{r}{c} (f_0 + f_i + f_d)\right) + \sum_{i=1}^n A_{i-} \cdot \cos\left(2\pi(f_0 - f_i + f_d)t - 4\pi \frac{r}{c} (f_0 - f_i + f_d)\right). \quad (6)$$

При радіолокаційному дослідженні об'єктів вимірювання амплітуд, доплеровських зсувів, фазових

зсувів на носійній частоті є дуже складним. Для вирішення даних питань відбитий зондуєчий сигнал перетворюють в область низьких частот детектуванням або демодуляцією. Розглянемо зворотне перетворення сигналу $s_2(t)$ в область низьких частот на нульову частоту. Для цього перемножимо сигнал на носійний сигнал. Будемо розглядати процес перетворення окремо по кожній складовій сигналу. Для носійної частоти:

$$\begin{aligned} s_{20}(t) &= A_0 \cdot \cos\left(2\pi f_0\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t - 4\pi \frac{r}{c} f_0\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \cdot \cos(2\pi f_0 t) = \\ &= \frac{A_0}{2} \cdot \left[\cos\left(2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c} f_0\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) + \cos\left(4\pi f_0 t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c} f_0\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Для верхньої смуги частот:

$$\begin{aligned} s_{2+}(t) &= \left[\sum_{i=1}^n A_{i+} \cdot \cos\left(2\pi(f_0 + f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 + f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \cdot \cos(2\pi f_0 t) = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{A_{i+}}{2} \left[\cos\left(2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 + f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos\left(4\pi f_0 t + 2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 + f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Для нижньої смуги частот:

$$\begin{aligned} s_{2-}(t) &= \left[\sum_{i=1}^n A_{i-} \cdot \cos\left(2\pi(f_0 - f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 - f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \cdot \cos(2\pi f_0 t) = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{A_{i-}}{2} \left[\cos\left(-2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 - f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos\left(4\pi f_0 t - 2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 - f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Аналіз виразів (7)-(9) показує що при зворотному перетворенні отримуємо по дві гармоніки: одна нижня і одна верхня. Верхня має подвоєну носійну частоту. У нижній складові із носійною частотою відсутня. При частотній фільтрації від верхньої гармоніки із частотою, що дорівнює подвоєній носійній частоті, можна позбавитись. В результаті вирази (7)-(9) перетворюються у наступні:

$$s_{20}(t) = \frac{A_0}{2} \cdot \cos\left(2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c} f_0\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \quad (10)$$

Для верхньої смуги частот:

$$s_{2+}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i+}}{2} \left[\cos\left(2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 + f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \quad (11)$$

Для нижньої смуги частот:

$$s_{2-}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i-}}{2} \left[\cos\left(-2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 - f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \quad (12)$$

Для отримання сумарного амплітудно-демодульованого сумарного сигналу відбитого від рухомої цілі необхідно додати усі вирази (10)-(12). В результаті отримаємо:

$$\begin{aligned} s_{20}(t) + s_{2+}(t) + s_{2-}(t) &= \frac{A_0}{2} \cdot \cos\left(2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c} f_0\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) + \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{A_{i+}}{2} \left[\cos\left(2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 + f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] + \\ &+ \sum_{i=1}^n \frac{A_{i-}}{2} \left[\cos\left(-2\pi f_i\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)t + 2\pi f_0 \frac{v_x}{c} t - 4\pi \frac{r}{c}(f_0 - f_i)\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Аналіз отриманого виразу дозволяє зробити висновок про те що в результуючому сигналі буде присутні дві змінні складові. Змінна складова із частотою що дорівнює частоті f_i зміщена на доплерівський зсув $\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)$. Також буде модуляція даного сигналу з частотою $f_0\left(1 + \frac{v_x}{c}\right)$. Разом із

зміщенням частоти відбувається зсув фази носійного сигналу та модулюючого сигналу. Для носійного сигналу фазовий зсув складає: $\frac{4\pi f_i}{c} \left(1 + \frac{v_x}{c}\right)$. Для модулюючого сигналу фазовий зсув складає: $\frac{4\pi f_0}{c} \left(1 + \frac{v_x}{c}\right)$. В обох випадках фазові зсуви залежать від частоти сигналу носійного чи модулюючого, відстані до об'єкту та від радіальної швидкості. Якщо задатись носійною частотою 10 ГГц, модулююча частота 100 кГц, відстань до об'єкта 5000 м, радіальна швидкість 50 м/с, тоді сигнал який можна отримати після демодуляції відбитого сигналу буде мати вигляд наведений на рис. 1.

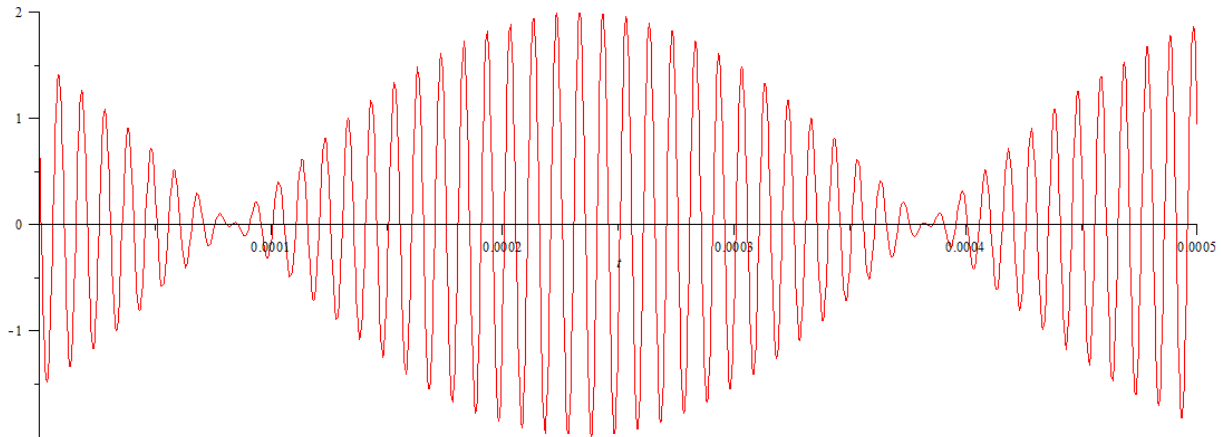


Рис. 1. Відбитий сигнал після демодуляції за умови зондування рухомого об'єкту

Зміна дальності чи радіальної швидкості приводить до зміни параметрів відбитого сигналу. Відповідно до наведених міркувань є можливість знаходити відстані, радіальні швидкості та характеристики об'єктів. Для цього необхідно проводити вимірювання зміни модулюючої частоти відбитого сигналу, фазовий зсув модулюючого сигналу, частоту модуляції низькочастотного модулюючого сигналу, фазовий зсув цього сигналу, а також амплітуду відбитого сигналу. В результаті спільного дослідження усіх наведених параметрів із врахуванням виразів що встановлюють залежності між носійною та моделюючою частотами, відстанню до об'єкту і його радіальною швидкістю, можна знаходити відстань до об'єкта, його радіальну швидкість та коефіцієнт відбиття, що представляють його основні параметри.

Висновки. Проведений аналіз різних методів зменшення пікфактору сигналу методом математичного моделювання і графічного виводу результатів для наглядного аналізу, показує особливості використання та переваги. На основі цього аналізу можна будувати наступні кроки реалізації даних досягнень, їх адаптація і вдосконалення, для використання для передачі даних в каналах зв'язку. Зроблені дослідження дають змогу говорити, що кількість гармонік досліджуваного сигналу є найпершим показником за яким ми починаємо дослідити, адже робота направлена на визначення загального алгоритму розв'язку для довільного числа гармонік. Адже в першу чергу дослідивши результати для встановленої кількості гармонік, дає змогу знайти спільні риси поведінки вихідного сигналу.

Література

1. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов/ Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский и др.; Под ред. Г.В. Глебовича.- М.: Радио и связь, 1984.- 256.
2. Ultra-wideband Radar Technology// Edited by James D. Taylor, P.E. CRC Press Boca Raton, London, New Work, Washington, - 2000, 27p.
3. Маевский С.М., Баженов В.Г., Батуревич Е.К., Куц Ю.В. Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний. – К.: Вища школа, Изд-во при Киев. ун-те, 1983, 84с.
4. Параска Г.Б., Шинкарук О.М., Любчик В.Р. Теоретичні основи фазових вимірювань відстаней до декількох об'єктів. - Електроніка і зв'язок, 3, 2010 - С.82-86.
5. Любчик В.Р., Сенчишина Ю.В., Параска Г.Б., Килимник О. М. Розробка аналітичного фазового методу вимірювання відстаней до трьох об'єктів// Вісник ХНУ, №2, 2009, - С.146-151.
6. Шинкарук О.М., Любчик В.Р., Дементьев Т.О. Дослідження потенційної точності та роздільної здатності фазового багаточастотного методу вимірювання відстаней. - Електроніка і зв'язок, №3, 2011 - С.78-82.

References

1. The study objects using picosecond pulses / G. Glebovich, A. Andrianov, Y. Vvedensky and others, ed. G. Glebovich. - M.: Radio and communication, 1984. - 256.
2. Ultra-wideband Radar Technology // Edited by James D. Taylor, P.E. CRC Press Boca Raton, London, New Work, Washington, -

3. Majewski S., Bazhenov V., Baturevich E., Kutz Y. Application of methods to precisely measure the phase meter distances. - K.: Vishcha School, Academy of the Kyiv. University are, 1983, 84с.
4. Paraska G., Shinkaruk O., Lubchik V., Teoretichni based on phase vimiryuvan vidstaney to dekilkoh ob'ektiv. - Elektronika zvyazok i, 3, 2010 - p.82-86.
5. Lubchik V., Senchishina Y., Paraska G., Kilimnik O. Rozrobka analitichnogo phase method vimiryuvannya vidstaney to troh ob'ektiv // News KNU, № 2, 2009 - p.146-151.
6. Shinkaruk O., Lubchik V., Dementev T. Doslidzhennya potentsiynoi tochnosti that rozdilnoi zdatnosti phase bagatochastotnogo method vimiryuvannya vidstaney. - Electronics and Communication, № 3, 2011 - p.78-82.

Надійшла до редакції
13.5.2013 р.

УДК 621.372.812

П.А. БУГАЁВ

Севастопольский национальный технический университет

ИЗМЕРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ УСТРОЙСТВ, ПОСТРОЕННЫЙ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОГО МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

В статье рассматривается измеритель комплексного коэффициента отражения и передач устройств, выполненных на базе плоского металлодиэлектрического волновода. Исключается влияние на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ части прибора путем проведения предложенных калибровочных операций.

Ключевые слова: плоский металлодиэлектрический волновод, комплексный коэффициент отражения, комплексный коэффициент передачи.

P.A. BUGAYOV

Sevastopol National Technical University

METER COMPLEX PARAMETERS OF MICROWAVE DEVICES, BUILT ON THE BASIS OF A FLAT METAL-DIELECTRIC WAVEGUIDE

The article discusses measuring the complex reflection coefficient and transmission devices formed on the basis of a flat metal-dielectric waveguide. The influence on the result of measurement of the interfering effects of its own microwave constants of the instrument by means of the proposed calibration operations.

Введение

Огромную роль в жизни современного человечества играют радиотехнические системы различного целевого назначения: радиолокации, космической связи, радионавигации, радиоуправления и пр. Основные технические характеристики этих систем существенным образом зависят от параметров микроволнового тракта. Поэтому на первый план выступает задача о том, как измерять требуемые параметры не только точно, но и быстро, просто, экономично. Использование сложных и дорогостоящих микроволновых преобразователей и средств измерения на их основе не всегда является оптимальным для ряда измерительных задач.

В настоящее время разрабатываются микроволновые устройства на основе конструктивно простой и экономичной линии передачи СВЧ диапазона — плоского металлодиэлектрического волновода (ПЛИМДВ) [1,2], который является альтернативным стандартному полого металлическому волноводу (ПМВ). Существующие измерительные приборы [3,4] не позволяют экспериментально обрабатывать предлагаемые плоские металлодиэлектрические волноводные узлы. Поэтому предложен измеритель комплексных параметров таких узлов, сочетающий в своей структурной схеме комбинации элементов, построенных как на основе нового типа волновода, так и стандартного — полого металлического. Устройством, объединяющим эти два вида элементов, является комбинированный направленный ответвитель, каналы которого выполнены на разнотипных волноводах [5]. В канал, построенный на основе ПМВ, включаются существующие необходимые измерительные элементы, а во второй — исследуемые устройства ПЛИМДВ.

Обобщенная структурная схема предложенного измерительного комплекса, представленная на рисунке 1, включает в себя следующие основные блоки и узлы: СВЧ генератор, комбинированный двунаправленный ответвитель, образцовую нагрузку, детекторную головку, короткозамыкающую пластину, согласованную нагрузку, подстроечный аттенюатор и индикаторное устройство.

Детекторная головка, подстроечный аттенюатор и согласованная нагрузка выполнены на основе плоского металлодиэлектрического волновода. Образцовая нагрузка представляет собой последовательное соединение поляризационного аттенюатора и фазовращателя отражательного типа переменной длины (подвижного короткозамыкателя). Эти устройства построены на основе стандартного — полого металлического волновода.