

# Шумовой мост для высокочастотных измерений

В настоящей статье описана конструкция высокочастотного моста, питаемого от генератора шумового сигнала. Индикатором баланса служит радиоприемник, настроенный на частоту измерения. Кроме того, в статье изложена методика испытаний, модернизации и калибровки моста, а также некоторые способы измерения параметров антенн и линий передачи.

**Ш**умовой ВЧ мост является одним из наиболее полезных измерительных приборов для высокочастотных измерений. При помощи этого несложного и недорогого прибора можно измерять полное, активное и комплексное сопротивление антенны, характеристическое сопротивление и потери в коаксиальном кабеле, а также полное сопротивление любых цепей на различных рабочих частотах.

Знание полного сопротивления антенны обеспечивает лучшее согласование, чем этого удается добиться при использовании измерителя КСВ. Зная зависимость полного сопротивления антенны от частоты, можно рассчитать согласующее устройство для работы в нужном диапазоне.

Несмотря на появление в последнее время многочисленных цифровых приборов с непосредственным отсчетом, старый добрый сбалансированный ВЧ мост не утратил своих позиций. Недорогие измерители комплексных параметров нагрузки, как правило, работают на одной частоте. Панорамные измерители — весьма дороги. И те, и другие могут давать случайные ошибки при проведении измерений, которые обнаружатся слишком поздно (например, когда отрезан и уложен 22-метровый кусок коаксиального кабеля вместо 23,5-метрового).

Разумеется, шумовой ВЧ мост не лишен недостатков. Точность измерений с его помощью невысока. Обычно она составляет 3...5%. В описаниях процедуры точной калибровки шкалы реактивного сопротивления шумового моста заметны серьезные несоответствия. И, наконец, обычно предполагается, что полное сопротивление антенны должно быть измерено или непосредственно на антенне, или на конце коаксиального кабеля, длина которого кратна половине длины волны на рабочей частоте. Применять кабель такой длины довольно неудобно, но даже кабель “правильной” длины может вносить существенные ошибки в процесс измерения. В лучшем случае, используя такой кабель, можно получить точные результаты только на одной частоте. Однако существует способ учета влияния линии передачи на результат измерений, который и будет описан ниже.

## Конструкция шумового моста

Блок-схема шумового моста показана на рис. 1. Он состоит из источника шума, который может быть дополнен амплитудным модулятором, и самого моста. Нагрузка с неизвестным импедансом подключается к разъему “Zx”. Приемник, подключаемый к разъему “RX”, используется в качестве нуль-индикатора моста. Мост сбалансирован, когда полное сопротивление его верхнего плеча равняется полному сопротивлению нижнего плеча. Баланса достигают, вращая переменный резистор (Rv) и конденсатор (Cv) до получения минимума сигнала на выходе приемника. Измерение импеданса производится на частоте настройки приемника. Если сигнал генератора

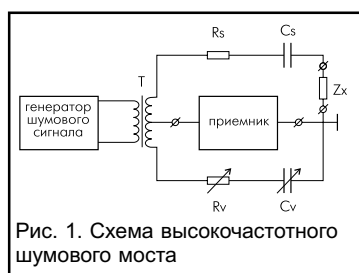


Рис. 1. Схема высокочастотного шумового моста

шума промодулирован по амплитуде, то и приемник должен использоваться в режиме приема сигналов с амплитудной модуляцией (AM). Для приема немодулированного шумового сигнала можно использовать режим “телеграф” (CW) или “однополосная модуляция” (SSB).

Представим импеданс радиочастотной цепи в виде последовательного соединения активного сопротивления R и реактивного X:

$$Z = R + jX. \quad [1]$$

Мост будет сбалансирован, если

$$R_x = R_v - R_c \quad [2]$$

и

$$X_x = X_v - X_c, \quad [3]$$

где  $R_x$  и  $X_x$  — соответственно активная и реактивная составляющие неизвестного импеданса.  $X_v$  и  $X_c$  — реактивные сопротивления конденсаторов моста.

## Проверка точности шумового моста

Для проверки точности шумового моста следует использовать качественную короткозамкнутую эталонную нагрузку и эталонные нагрузки с известным постоянным сопротивлением. Нагрузка с переменным сопротивлением используется для измерения потерь в коаксиальном кабеле.

Эталонная нагрузка представляет собой безиндуктивный резистор, размещенный внутри кабельной вилки разъема, соответствующего тому, который применен для подключения ко входу “Zx” моста. При изготовлении этих нагрузок следует минимизировать паразитные эффекты. В качестве постоянных подойдут композитные углеродистые резисторы мощностью 0,125...0,25 Вт. Потенциометр в нагрузке с переменным сопротивлением — миниатюрный подстроечный резистор сопротивлением 100 Ом.

При калибровке шумового моста данные измерений не должны изменяться при изменении частоты. Однако опыт работы с несколькими промышленными шумовыми мостами показал, что измеренные с их помощью величины активного или реактивного сопротивления зависят от частоты, и, следовательно, такие измерения не вполне достоверны. Для проведения калибровки вход приемника подключают к разъему “RX” моста, разъем “Zx” замыкают накоротко. Приемник настраивают на нижнюю рабочую частоту и добиваются баланса моста, вращая переменные резистор и конденсатор до пропадания шумового сигнала на выходе приемника. Если мост откалиброван, шкалы активного и реактивного сопротивлений должны показывать 0 Ом.

По достижении баланса моста частоту приемника увеличивают на несколько мегагерц и повторяют измерение. Показания на активной и реактивной шкалах не должны измениться. Эту же процедуру повторяют и на верхней рабочей частоте моста. После этого мост с нагрузками 50 Ом и 180 Ом проверяют на частоте на несколько мегагерц выше нижней частоты моста. С этими нагрузками он должен показать соответствующее активное сопротивление (50 или 180 Ом) и нулевое реактивное сопротивление.

Резистивные нагрузки могут иметь небольшое отрицательное реактивное сопротивление на более высоких частотах, определяемое емкостью разъема (около 5 пФ для CP-50-73). На частоте 30 МГц реактивные сопротивления самодельных нагрузок будут иметь значения около -2 Ом для 50-омной и -30 Ом для 180-омной нагрузок соответственно. При замкнутом накоротко разъеме “Zx” реактивное сопротивление должно оставаться нулевым в рабочем диапазоне частот. На

нижних частотах реактивное сопротивление нагрузок 50 и 180 Ом не должно изменяться.

Если изготовленный шумовой мост эти проверки выдержал, значит, он имеет хорошую конструкцию, и его модернизация в дальнейшем не потребуется.

**Улучшение характеристик шумового моста**

Схема модернизированного шумового моста показана на рис. 2. Главная причина частотной зависимости его нуля — конструкция трансформатора Т1. В большинстве ВЧ мостов его наматывают тремя скрученными проводами на кольце из феррита или карбонильного железа. Такая конструкция является причиной сдвига фазы во вторичных обмотках трансформатора на высоких частотах, что и является причиной изменения результатов измерений при изменении частоты. В некоторых трансформаторах используют сердечник с низкой магнитной проницаемостью, недостаточной для работы моста на низких частотах.

Обе эти проблемы могут быть решены, если применить ферритовый сердечник с двумя отверстиями для намотки, как показано на рис. 3. Трансформатором с таким сердеч-

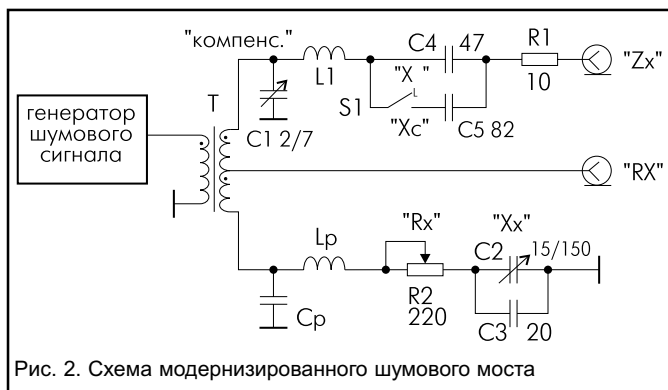


Рис. 2. Схема модернизированного шумового моста

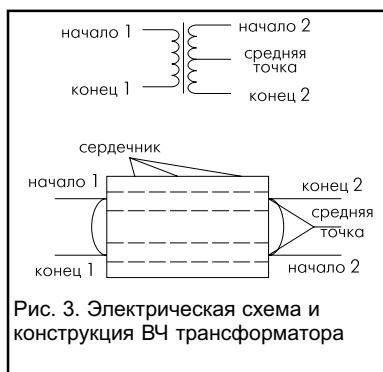


Рис. 3. Электрическая схема и конструкция ВЧ трансформатора

ником необходимо заменить трансформатор с тороидальным сердечником моста. Хорошо зарекомендовали себя ферритовые сердечники, применявшиеся в старых комнатных телевизионных антеннах; их следует склеить вместе по 2-3 штуки. Обмотку выполняют проводом максимально возможного диаметра,

стремясь заполнить все сечение отверстия полученного сердечника.

**Паразитная емкость**

Паразитная емкость в плече, где установлен переменный резистор моста, больше, чем в плече с неизвестной реактивностью, поскольку паразитная емкость переменного резистора Rv сравнительно высока. Эта емкость обозначена на рис. 2 как Cp.



Рис. 4. Активное и реактивное

Влияние Cp проще обнаружить, используя нагрузку 180 Ом. Необходимо подключить ее к разъему "Zx", настроить приемник на самую низкую рабочую частоту моста и сбалансировать мост. После этого омметром измеряют сопротивление переменного резистора

моста. Если оно больше, чем сопротивление нагрузки 180 Ом плюс сопротивление резистора Rs, то в регулируемом плече моста имеется паразитная емкость. Величина паразитной емкости может быть рассчитана по формуле:

$$C_p = C_s \left( \sqrt{\frac{R_v}{R_L + R_c}} - 1 \right), \quad [4]$$

где RL — сопротивление нагрузки (в данном случае 180 Ом); Rv — сопротивление переменного резистора; Cs — последовательная емкость.

Эту паразитную емкость можно скомпенсировать, если включить дополнительный переменный конденсатор (C1 на рис. 2) в плечо моста с неизвестной реактивностью. Для подбора емкости этого конденсатора с помощью омметра надо установить сопротивление переменного резистора Rv равным сопротивлению нагрузки 180 Ом плюс сопротивление резистора Rs (также измеренное омметром). Затем следует установить "0" на шкале переменного конденсатора моста и подбирать (регулировать) емкость компенсационного конденсатора до получения баланса моста. Напомним, что подбор конденсатора необходимо производить на низкой рабочей частоте моста, чтобы уменьшить его разбалансировку из-за паразитной индуктивности (см. ниже). Типовое значение емкости этого конденсатора составляет 5...10 пФ.

**Паразитная индуктивность**

Второй нежелательный эффект вызывается паразитной индуктивностью переменного резистора (Lp на рис. 3). Обнаружить ее влияние можно замкнув разъем "Zx" и измеряя реактивное сопротивление на самой низкой и самой высокой рабочей частоте моста, которое в обоих случаях должно быть одинаковым. Если при увеличении частоты реактивное сопротивление уменьшается, значит, переменный резистор имеет паразитную индуктивность, и компенсационную индуктивность следует включить в плечо с неизвестным импедансом. Если реактивное сопротивление с увеличением частоты увеличивается, то дополнительная индуктивность находится в плече с неизвестным импедансом, и компенсационную индуктивность необходимо включить в плечо с переменным резистором.

Паразитная индуктивность обычно имеет величину порядка нескольких десятых наногенри, что дает погрешность в несколько ом на частоте 30 МГц. Эта индуктивность компенсируется установкой одного витка провода длиной 25...50 мм, установленного в нужном плече моста. Размер и форму этого витка изменяют до тех пор, пока реактивная составляющая не станет постоянной во всем диапазоне рабочих частот моста. Обычно один виток провода диаметром 1...1,5 мм и длиной 30 мм, включенный в плечо с неизвестной реактивностью, позволяет решить эту проблему.

**Пределы измерения реактивности**

Пределы измерения реактивности шумовым мостом определяются в основном рабочей частотой, величиной емкости последовательно включенного конденсатора (C4C5 на рис. 2) и соотношением максимальной и минимальной емкости переменного конденсатора (Cv на рис. 1).

Определить диапазон измеряемых реактивных сопротивлений шумового моста можно исходя из максимальной величины KCB, измеряемого мостом. Вполне реально добиться диапазона значений измеряемого KCB до 5:1 при нагрузке 50 Ом и максимальной частоте 30 МГц. Для этого мост должен измерять активное сопротивление от 5 до 250 Ом и реактивное сопротивление от -120 до +120 Ом. На частоте 10 МГц это эквивалентно диапазону реактивных сопротивлений от -360 до +360 Ом. Этот диапазон измерений практически достижим в конструкции, показанной на рис. 2. Диапазоны измерения активного и реактивного сопротивлений на частоте 10 МГц после модернизации составляют от 0 до 220 Ом и от -400 до +230 Ом соответственно. Погрешность измерений — ±5 Ом (т. е. 10% импеданса).

Конденсатор емкостью 20 пФ, подключенный параллельно C2, ограничивает диапазон изменения емкости C2. Пере-

ключатель  $X_i/X_c$  смещает предел измерения реактивного сопротивления в сторону емкостного или индуктивного сопротивления. Точка нулевого реактивного сопротивления получается вблизи максимальной или минимальной емкости  $C_2$ .

### Калибровка

Точность мостовых измерений напрямую зависит от тщательности калибровки. Калибровка шкалы активного сопротивления непосредственная. Чтобы произвести калибровку, нужно настроить приемник на частоту, например, около 10 МГц, замкнуть разъем "Zx" и сбалансировать мост. Получится точка активного нулевого сопротивления.

Остальную часть шкалы активного сопротивления калибруют, используя омметр, обеспечивающий необходимую точность измерений, и измеряя им сопротивление переменного резистора  $R_2$ , а затем отмечая значение измеренного сопротивления на шкале с шагом 5...10 Ом.

Калибровка шкалы реактивного сопротивления зависит от того, как вы хотите считывать реактивное сопротивление моста. Большинство опубликованных методов калибровки обеспечивают измерение реактивного сопротивления в единицах емкости. Однако представляет интерес метод калибровки шкалы реактивности в единицах сопротивления на частоте 10 МГц. Преимущество этого метода состоит в том, что он дает результат в тех единицах, которые и интересуют нас при измерении импеданса. Считанное со шкалы значение легко пересчитать, если частота измерений отличается от 10 МГц, по формуле:

$$X_{x(f)} = X_{x(10)} \frac{10}{f}, \quad [5]$$

где  $f$  — частота в МГц;  $X_x(10)$  — неизвестное реактивное сопротивление на частоте 10 МГц.

Для калибровки шкалы реактивного сопротивления требуется кусок коаксиального кабеля, который послужит его эталоном. (Реактивное сопротивление куска короткозамкнутого коаксиального кабеля с низкими потерями зависит только от частоты измерения, длины и характеристического волнового сопротивления кабеля). Следует использовать кабель достаточно высокого качества, например, РК50-9-12 или импортный RG-8. Его стоимость оправдана высокой достоверностью и точностью последующих измерений.

Ниже приведена последовательность действий процедуры калибровки шкалы реактивного сопротивления:

1. Отрезать кусок коаксиального кабеля длиной чуть больше  $1/4$  длины волны (с учетом коэффициента укорочения). На один из концов отрезка установить разъем для его подключения к входу "Zx", а другой конец оставить незамкнутым. Этот кабель будет использоваться как эталон для калибровки шкалы реактивного сопротивления.

2. Замкнуть накоротко разъем "Zx" шумового моста и настроить приемник на частоту 10 МГц. Сбалансировать шумовой мост. После этого ручку реактивного сопротивления не трогать.

3. Подключить калибровочный кабель к гнезду "Zx". Сбалансировать мост, перестраивая только частоту приемника и вращая переменный резистор. После окончания балансировки частота настройки приемника должна быть ниже 10 МГц. Если она выше 10 МГц, это значит, что отрезан слишком короткий кабель, и необходимо будет подготовить новый, более длинный отрезок.

4. Постепенно укорачивать коаксиальный кабель, пока баланс моста не будет установлен точно на частоте 10 МГц, вращая только переменный резистор со шкалой активного сопротивления. Затем соединить центральную жилу с оплеткой на конце кабеля. Необходимо убедиться, что мост балансируется на частоте 20 МГц при установке шкалы реактивного сопротивления на 0 (для этой частоты отрезок будет полуволновым).

5. Теперь шкала реактивного сопротивления готова к калибровке. Реактивное сопротивление коаксиального кабеля, приведенное к 10 МГц, может быть рассчитано по формуле:

$$X_{i(10)} = R_0 \frac{f}{10} \operatorname{tg}(2\pi \frac{f}{40}), \quad [6]$$

где  $X_j(10)$  — реактивное сопротивление кабеля на 10 МГц;  $R_0$  — характеристическое сопротивление коаксиального кабеля;  $f$  — частота в МГц.

Для RG-8M, например,  $R_0$  составляет 52,5 Ом.

Ошибка при расчете по формуле [6] составляет менее 5% для сопротивлений менее 500 Ом при условии, что потери в измерительном кабеле не превышают 0,2 дБ. Эта ошибка становится существенно меньше при меньших реактивных сопротивлениях (около 2% для 300 Ом при потерях 0,2 дБ в кабеле).

6. Настроить приемник на соответствующую частоту для нужного реактивного сопротивления (рассчитанного по формуле [6]). Сбалансировать мост, используя регуляторы активного и реактивного сопротивлений. Отметить на шкале реактивное сопротивление. Повторить эту процедуру, пока все нужные значения реактивного сопротивления не будут отмечены на шкале. Значение активного сопротивления, необходимое для балансировки моста во время этой калибровки, может быть более 100 Ом при больших значениях реактивного сопротивления.

Этот метод калибровки намного более точен, чем метод подключения конденсаторов постоянной емкости к разъему "Zx".

### Измерение параметров коаксиального кабеля с помощью шумового моста

К наиболее важным характеристикам кабеля относится вносимое затухание и характеристическое (волновое) сопротивление. Однако, если шумовой мост использовать для измерения импеданса антенны, также необходимо точно определить и электрическую длину (коэффициент укорочения) кабеля. Все эти параметры можно легко измерить при помощи шумового моста.

Первый параметр — электрическая длина кабеля. Имеется множество путей выражения электрической длины кабеля. Мы выразим длину кабеля через частоту, на которой по длине данного куска кабеля размещается одна волна. Эту частоту назовем  $\lambda$ . Для ее определения необходима следующая последовательность действий:

1) Настроить приемник на интересующую вас частоту, замкнуть разъем "Zx" и сбалансировать мост.

2) Замкнуть накоротко дальний конец коаксиального кабеля и подключить ближний конец кабеля к разъему "Zx" моста.

3) Изменять частоту приемника и вращать регулятор активного сопротивления моста до получения его баланса, не изменяя положения регулятора реактивного сопротивления в течение этой процедуры. Запомнить частоту, на которой найден баланс моста (назовем ее  $f_1$ ). Активное сопротивление при балансе должно быть относительно небольшим (менее 20 Ом).

4) Перестраивать приемник вверх по частоте, пока не будет достигнут баланс моста на более высокой частоте. При необходимости подстроить регулятор активного сопротивления для более точной балансировки. При этом нельзя трогать регулятор реактивного сопротивления. Частоту, на которой найден второй баланс моста, назовем  $f_2$ .

5) Теперь можно найти значение  $n$ :

$$n = \frac{2f_n}{f_{n+2} - f_n}, \quad [7]$$

и электрическую длину кабеля:

$$l_\lambda = \frac{4\lambda_n}{n}, \quad [8]$$

Значение  $n$  до ближайшего целого числа следует округлить.

Эту процедуру можно выполнить и с разомкнутым на конце коаксиальным кабелем. Однако емкость на незакороченном конце увеличивает эффективную длину кабеля, что приводит к занижению значения  $f_\lambda$ . Если данная процедура будет выполнена с разомкнутым на конце коаксиальным кабелем, то  $n$  должно быть нечетным.

Характеристическое сопротивление коаксиального кабеля определяют, измеряя его полное входное сопротивление на двух частотах, отстоящих друг от друга на  $f_\lambda/4$ . Измерение производится, когда на конце кабеля включена резистивная нагрузка. Характеристическое сопротивление также (хотя и слабо) зависит от частоты, поэтому измерение следует производить вблизи интересующей вас частоты.

Ниже приведена последовательность действий процедуры измерения.

1. Подключить 50-омную нагрузку к дальнему концу коаксиального кабеля, а также подключить ближний конец кабеля к разъему "Zx" шумового моста. Ошибка измерения минимальна, если сопротивление нагрузки близко к волновому сопротивлению кабеля.

2. Настроить приемник приблизительно на  $f_\lambda/8$  МГц ниже интересующей вас частоты. Сбалансировать мост, используя регуляторы активного и реактивного сопротивлений, и запомнить полученные значения как  $R(f)$  и  $X(f)$ . Не надо забывать, что считанное со шкалы значение реактивного сопротивления должно быть пересчитано на частоту, на которой проводится измерение.

3. Увеличить частоту приемника точно до  $f_\lambda/4$ . Снова сбалансировать мост и записать полученные значения сопротивлений как  $R(f + f_\lambda/4)$  и  $X(f + f_\lambda/4)$ .

4. Вычислить характеристическое сопротивление коаксиального кабеля, используя формулы [9-14]:

$$R = R_f \times R_{f+f_\lambda/4} - X_f \times X_{f+f_\lambda/4} \quad [9]$$

$$X = R_f \times X_{f+f_\lambda/4} + X_f \times R_{f+f_\lambda/4}, \quad [10]$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad [11]$$

$$R_0 = \sqrt{Z} \cos \frac{1}{\operatorname{tg}(\frac{X}{R})}, \quad [12]$$

$$X_0 = \sqrt{Z} \sin \frac{1}{\operatorname{tg}(\frac{X}{R})}, \quad [13]$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0. \quad [14]$$

Большинство 50-омных кабелей имеют активную часть волнового сопротивления 45...60 Ом и реактивную часть от -2...-10 Ом.

Следующая методика позволяет измерить потери в кабеле на отрезке длиной  $f_\lambda/4$  на заданной частоте. Потери между точками измерения могут быть интерполированы с необходимой точностью. Эта методика использует способ замещения и обеспечивает более высокую точность измерения, чем при непосредственном считывании сопротивления со шкалы шумового моста, что весьма важно, поскольку потери в кабеле невелики. Ниже приведена методика измерения потерь в кабеле на отрезке длиной  $f_\lambda/4$  на заданной частоте:

1) Определить примерную частоту, на которой вы желаете произвести измерение потерь, используя формулу:

$$f = n \cdot f_\lambda / 4, \quad [15]$$

где  $n$  — любое положительное целое число.

2) Если  $n$  — нечетное число, то необходимо оставить дальний конец коаксиального кабеля незамкнутым; если  $n$  — четное, замкнуть его накоротко. Подключить ближний конец кабеля к разъему "Zx" моста.

3) Установить на шумовом мосту нулевое реактивное сопротивление. Перестраивая частоту приемника и вращая регулятор активного сопротивления, надо добиться полного баланса моста.

4) Подключить нагрузку с переменным сопротивлением к разъему "Zx" моста. Не трогая регулятор активного сопротивления моста, изменять сопротивление резистора нагрузки и реактивное сопротивление моста до получения баланса.

5) Отключить нагрузку с переменным сопротивлением от гнезда "Zx" и измерить достаточно точным омметром сопротивление резистора нагрузки. Измеренное сопротивление и будет  $R_j$ .

6) Вычислить потери в кабеле (в децибелах):

$$\alpha^l = 8,69 \frac{R_i}{R_0} \quad [15]$$

### Использование шумового моста для измерения импеданса антенны

Используя шумовой мост, можно легко измерить входной импеданс линии передачи, подключенной к антенне. Нас же интересует полное сопротивление антенны, которая является нагрузкой на дальнем конце линии передачи. Есть несколько способов справиться с этой задачей.

Замеры можно сделать, подключив шумовой мост непосредственно к антенне. Это обычно не практикуется, потому что для правильного измерения антенна должна находиться на рабочей высоте. Это очень неудобно, а порой невозможно. Кроме того, оборудование и оператор, находящиеся вблизи антенны, могут заметно повлиять на ее параметры.

Измерения можно произвести на конце коаксиального кабеля, если длина кабеля точно кратна целому числу длин полуволн. Однако это ограничивает измерение одной единственной частотой. Определение импеданса антенны таким методом даже в пределах радиолюбительских диапазонов дает существенную ошибку.

Измеренные данные можно скорректировать графическим способом при условии, что КСВ не слишком высок и потери в кабеле достаточно малы. Однако этот метод не учитывает комплексный состав импеданса реальных коаксиальных кабелей. Также очень сложно учесть потери в кабеле. Все это может привести к существенным ошибкам измерений.

Наконец, измерения можно скорректировать, используя уравнение линии передачи. Его можно решить, используя инженерный или программируемый калькулятор, или персональный компьютер. Это, видимо, лучший метод для вычисления импеданса антенны по измеренным параметрам. Его единственным неудобство в том, что вам заранее требуется измерить некоторые характеристики линии передачи. Для определения импеданса антенны последним способом сначала необходимо измерить электрическую длину, волновое сопротивление и ослабление коаксиального кабеля, который будет подключен к антенне. После проведения этих измерений надо подсоединить его к антенне и измерить полное входное сопротивление на нескольких частотах в рабочем диапазоне антенны. Затем по данным этих измерений определяется фактический импеданс антенны на каждой из частот, решая уравнение линии передачи.

Для расчета возьмем антенну "inverted V" 10-метрового радиолюбительского диапазона. Точка питания находится на высоте 9 м, угол между лучами составляет  $120^\circ$ . Антенна питается по 50-омному коаксиальному кабелю длиной 23 м.

Глядя на график замеров (рис. 4), очень трудно сказать что-либо относительно характеристик антенны. Активное и реактивное сопротивления в пределах диапазона существенно изменяются, просматриваются резонансы на частотах 27,7, 29 и 29,8 МГц.

На рис. 5 показан истинный импеданс антенны, пересчитанный по уравнению линии передачи. Теперь видно, что истинные активное и реактивное сопротивления антенны плавно увеличиваются с частотой. Истинный резонанс имеет место на 28,8 МГц, сопротивление излучения в точке резонанса — 47 Ом. Примерно такими и должны быть характеристики антенны этого типа.

При выполнении измерений нужно быть внимательным, чтобы не допустить ошибок. Они могут привести к еще большому искажению результата после перерасчета, особенно, когда длина линии передачи кратна нечетному числу четвертей длины волны и при большом ослаблении. Если небольшие изменения полного входного сопротивления или характеристик линии передачи приводят к большим изменениям сопротивления антенны, то есть вероятность, что произошла ошибка при измерении. Чтобы свести ошибки к минимуму,



или путем расчета уравнения линии передачи. Линия передачи может быть как двухпроводной линией, так и коаксиальным кабелем. С появлением персональных компьютеров в радиолюбительской практике расчет импеданса стал более простым и точным.

Преобразование импеданса линии передачи описывается уравнением:

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_L \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l)}{Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_L \operatorname{sh}(\gamma l)}, \quad [17]$$

где  $Z_i$  — входной импеданс линии передачи;  $Z_0$  — характеристическое волновое сопротивление линии передачи;  $Z_L$  — импеданс нагрузки на конце линии передачи;  $l$  — длина линии передачи;  $\gamma$  — комплексная константа распространения,  $\gamma = \alpha + j\beta$ ;  $\alpha$  — постоянная затухания, в неперах на единицу длины ( $1 \text{ Нп} = 8,69 \text{ дБ}$ );  $\beta$  — фазовая постоянная, в радианах на единицу длины.

Импедансы и константа распространения — комплексные числа. Комплексные гиперболический синус и косинус могут быть найдены по известным тригонометрическим формулам.

Для нахождения полного импеданса нагрузки, зная входной импеданс линии передачи, уравнение линии передачи лучше записать так:

$$Z_L = Z_0 \frac{Z_i \operatorname{ch}(\gamma l) - Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l)}{Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l) - Z_i \operatorname{sh}(\gamma l)}, \quad [18]$$

Большинство измерений производится при неизменной длине коаксиального кабеля. Поэтому мы будем считать, что  $\alpha l$  является постоянной величиной, которую мы назовем ослаблением кабеля. Обычно оно измеряется в децибелах, но его необходимо пересчитать в неперы для использования в уравнении линии передачи.

Зависимость фазовой постоянной от частоты и длины линии передачи:

$$\beta l = 2\pi \frac{f_1}{f_\lambda}, \quad [19]$$

где  $f_1$  — рабочая частота;  $f_\lambda$  — частота, на которой линия передачи имеет электрическую длину, равную  $\lambda$ .

Для нахождения  $f_1$  используется короткозамкнутая линия передачи. Чтобы сделать это, надо найти частоту  $f(n)$ , на которой линия передачи имеет нулевое реактивное и низкое активное сопротивление, меньшее, чем ее характеристическое сопротивление. Увеличиваем частоту, пока не найдется следующая точка с нулевым реактивным сопротивлением  $f(n+2)$ , где  $n$  — число четвертей длины волны, которые укладываются на линии передачи.

Расчет  $f_1$  по [19] предполагает, что линия передачи имеет чисто активное характеристическое волновое сопротивление. На самом деле это не так, но получаемый по [19] результат достаточно точен; ошибка составляет менее 2,5% для линии передачи с потерями менее 3 дБ и реактивной компонентой характеристического волнового сопротивления менее 10 Ом.

Характеристическое волновое сопротивление линии передачи почти всегда является комплексной величиной. Хо-

лучше всего использовать линию передачи с длиной, кратной целому числу полуволн.

Таким образом, преобразование импеданса, вызванное линией передачи, может быть найдено или графически путем с использованием диаграммы Смита

роший коаксиальный кабель имеет очень маленькую реактивную компоненту волнового сопротивления (порядка нескольких ом). Проще всего найти волновое сопротивление кабеля, помещая нагрузку на одном конце кабеля и измеряя импеданс на другом конце, на двух частотах, отстоящих на  $f_\lambda/4$ . В этом случае полное входное сопротивление кабеля будет равно:

$$Z_i(f) = Z_0 \left( \frac{Z_L \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l)}{Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l) + Z_L \operatorname{sh}(\gamma l)} \right) \quad [20]$$

и

$$Z_i(f + f_\lambda/4) = Z_0 \left( \frac{Z_L \operatorname{sh}(\gamma l) + Z_0 \operatorname{ch}(\gamma l)}{Z_0 \operatorname{sh}(\gamma l) + Z_L \operatorname{ch}(\gamma l)} \right). \quad [21]$$

Используя [20] и [21], можно найти характеристическое волновое сопротивление по формуле:

$$Z_0 = \sqrt{Z_i(f) \times Z_i(f + f_\lambda/4)}. \quad [22]$$

В данном выражении квадратный корень является комплексным и может быть рассчитан по формулам [23–27]:

$$Z = R + jX = Z_i(f) Z_i(f + f_\lambda/4), \quad [23]$$

$$R = \sqrt{|Z|} \cos[1/2 \operatorname{tg}^{-1}(X/R)], \quad [24]$$

$$X_0 = \sqrt{|Z|} \sin[1/2 \operatorname{tg}^{-1}(X/R)], \quad [25]$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad [26]$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0. \quad [27]$$

Если длина линии передачи кратна нечетному количеству четвертей длины волны ( $n = 1, 3, 5, \dots$ ), и линия открыта на конце, или если длина линии передачи кратна четному количеству четвертей длины волны ( $n = 2, 4, 6, \dots$ ), и линия на конце замкнута накоротко, то полное входное сопротивление будет равно:

$$Z_i = \alpha Z_0. \quad [28]$$

Ослабление такой линии передачи может быть найдено по формуле:

$$\alpha l = \frac{R_i}{R_0}, \quad [29]$$

где  $R_i$  и  $R_0$  — активные части полного входного и характеристического волнового сопротивления соответственно.

Ослабление линии передачи увеличивается с частотой. Оценить это ослабление можно, используя следующее уравнение

$$\alpha l(f) = \alpha l(f_\alpha) \left( \frac{f}{f_\alpha} \right)^\sigma, \quad [30]$$

где  $\sigma$  находится в пределах от 0,5 до 1.

Это уравнение можно использовать, чтобы интерполировать неизмеренные величины ослабления. Для большинства коаксиальных кабелей подходит значение  $\sigma = 0,5$ .

Все эти расчеты имеют смысл, если вы занимаетесь совершенствованием именно антенны. Если же перед вами стоит только задача оптимального согласования антенно-фидерного устройства, то вас должен интересовать именно импеданс, измеренный на "нижнем" конце антенного кабеля, поскольку вашему передатчику или антенному тюнеру придется иметь дело именно с этой величиной. Впрочем, и в этом случае истинные параметры вашей антенны небезынтересны.

Хацусиро Казимота  
kazimota@mail.ru

### Литература

1. А. Чванов. Шумовой мост для высокочастотных измерений. — "Радиолюбитель", 1996, № 1, с. 30.