

Использование антенных шумовых мостов и методы их улучшения

В этой статье описано, как улучшить характеристики и точность измерения вашего шумового моста, а также методы работы с ним .

By John Grebenkemper, KI6WX
ARRL Technical Advisor
Tandem Computers, Inc
10501 N Tantau Ave Cupertino.
CA 95014

Шумовой антенный мост-один из наиболее полезных измерительных приборов, доступных радиолюбителям. При помощи шумового моста можно измерять импеданс антенны, потери в коаксиальном кабеле и характеристическое сопротивление, а также импеданс компонентов на различных рабочих частотах. Все это вы можете делать при помощи шумового моста, который стоит меньше \$60.

Измерение импеданса очень важно при конструировании и изготовлении антенн. Знание импеданса антенны позволяет вам настраивать ее для получения оптимального согласования более эффективно, нежели при использовании только измерителя КСВ. Зная, как импеданс антенны изменяется в полосе частот, вы можете рассчитать согласующее устройство для работы в нужном диапазоне частот.

К сожалению, чаще всего все возможности шумового моста не используются. Этому также способствует невысокая точность измерений. Кроме того, я никогда не встречал хорошего описания процедуры для точной калибровки шкалы реактивного сопротивления шумового моста. И наконец, в опубликованных статьях по шумовым мостам полагается, что измерения импеданса антенны должны быть сделаны или непосредственно на антенне, или на конце коаксиального кабеля, длина которого кратна половине длины волны на рабочей частоте антенны. 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.

В этой статье я опишу несколько простых доработок, которые можно внести в имеющийся у вас шумовой мост, чтобы существенно увеличить

его точность. Я также опишу методы калибровки активной и реактивной шкал. Кроме того, я покажу, как использовать шумовой мост, чтобы измерить потери в кабеле, его характеристическое волновое сопротивление и электрическую длину, и измерить импеданс антенны — даже если она находится на высоте 100 футов и подключена через кабель произвольной длины.

Я доработал и откалибровал мой шумовой мост Palomar Engineers, используя рекомендации из данной статьи

Конструкция шумового моста

Блок-схема шумового моста показана на Рис. 1. Он состоит из источника шума, который может дополнительно модулироваться или нет, усилителя и моста. Измеряемый неизвестный импеданс подключается к разъему UNKNOWN. Приемник, подключаемый к разъему RECEIVER, используется для обна-

ружения баланса моста.

Мост сбалансирован, когда полное сопротивление верхнего плеча моста равняется полному сопротивлению нижнего плеча. Баланс моста ищут, вращая переменный резистор (R_v) и конденсатор (C_v) до получения минимума шума в приемнике. Измерение импеданса производится на частоте, на которую настроен приемник. Приемник должен использоваться в режиме АМ, но если режим АМ отсутствует, то можно использовать СW или SSB.

В данной статье я буду использовать представление импеданса в виде последовательного соединения. Импеданс - это комплексная величина, в которой активное сопротивление является реальной частью, а реактивное сопротивление - мнимой частью. Оба они измеряются в Омах; j обозначает мнимую часть. Импеданс радиочастотной цепи, которая имеет активное сопротивление R и реактивное сопротивление X , представляется как

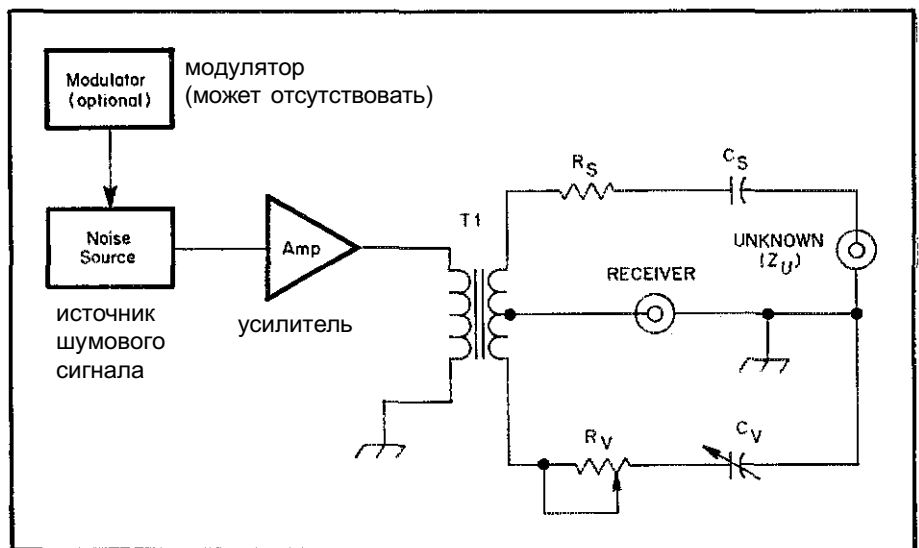


Рис. 1 - Блок-схема шумового моста.

R_v и C_v - это переменные резистор и конденсатор, которые используются для балансировки моста. Z_u - это неизвестный импеданс, который состоит из активной (R_u) и реактивной (X_u) составляющих. R_s и C_s включены последовательно с измеряемым импедансом.

$$Z = R + jX \quad (\text{Eq 1})$$

Мост будет сбалансирован, если

$$R_u = R_v - R_s \quad (\text{Eq 2})$$

и

$$X_u = X_v - X_s \quad (\text{Eq 3})$$

где

R_u и X_u представляют из себя активную и реактивную части, соответственно, неизвестного импеданса.

X_v и X_s представляют из себя реактивные сопротивления конденсаторов моста.

Дополнительную информацию по поводу реактивного сопротивления можно найти в *The ARRL Handbook*¹ и *The ARRL Extra Class License Manual*.²

Проверка точности шумового моста

Для проверки точности шумового моста вы должны использовать качественные калибровочные нагрузки. Здесь я опишу короткозамкнутую нагрузку, 50-Ω нагрузку, 180-Ω нагрузку и нагрузку с переменным сопротивлением. Короткозамкнутая нагрузка и нагрузки с постоянным сопротивлением используются для того, чтобы проверить точность шумового моста; нагрузка с переменным сопротивлением используется для измерения потерь в коаксиальном кабеле.

Детали конструкции нагрузок показаны на Рис.2. Каждая нагрузка размещена внутри ВЧ-разъема (PL-259). При изготовлении этих нагрузок надо стараться минимизировать паразитные эффекты. Резисторы дол-

жны быть безиндуктивными (непроволочными). Должны прекрасно подойти углеродистые композитные резисторы мощностью 0.25 Ватта. Потенциометр в нагрузке с переменным сопротивлением - миниатюрный подстроечный резистор с максимальным сопротивлением 100 Ω или меньше. Движок потенциометра и один из выводов припаяны к центральному выводу разъема PL-259; другой вывод припаян к корпусу разъема.

При калибровке шумового моста первым делом необходимо убедиться, что данные измерений не изменяются с частотой. Соедините приемник с разъемом RECEIVER моста и подключите короткозамкнутую нагрузку к разъему UNKNOWN. Настройте приемник на низшую рабочую частоту моста и добейтесь баланса моста, вращая переменные резистор и конденсатор до пропадания шумового сигнала в приемнике. Если мост отлично откалиброван, то шкалы активного и реактивного сопротивления должны показывать ноль Ом.

Когда вы достигли баланса моста, увеличьте частоту приемника на несколько мегагерц и повторите измерение. Показания на активной и реактивной шкалах не должны измениться. Повторите эту процедуру на вышней рабочей частоте моста.

Проверьте мост на частоте несколько мегагерц выше минимальной частоты моста с нагрузками 50Ω и 180Ω. С этими нагрузками мост дол-

жен показать соответствующее активное сопротивление (50 или 180 Ω) и нулевое реактивное сопротивление. Резистивные нагрузки могут иметь некоторое отрицательное реактивное сопротивление на более высоких частотах; это следствие емкости разьема (приблизительно 5 пФ). На частоте 30 МГц будут реактивные сопротивления - приблизительно -2Ω для 50-Ω нагрузки и - 30Ω для 180-Ω нагрузки.

Реактивное сопротивление должно оставаться одним и тем же (нулевым) в рабочем диапазоне частот при подключенной короткозамкнутой нагрузке и на низких частотах с резистивными нагрузками. С короткозамкнутой нагрузкой реактивное сопротивление должно оставаться постоянными при изменении частоты.

Если ваш шумовой мост прошел эти проверки, значит он имеет хорошую конструкцию и вы можете не читать раздел о модернизации. Мой опыт работы с несколькими промышленными шумовыми мостами показал, что большинство из них несовершенны; измеренные значения активного или реактивного сопротивления зависят от частоты — а это нехорошо. Доработки, описанные в следующем разделе, позволят вам значительно улучшить характеристики шумового моста.

Улучшение характеристик шумового моста

Схема модернизированного мос-

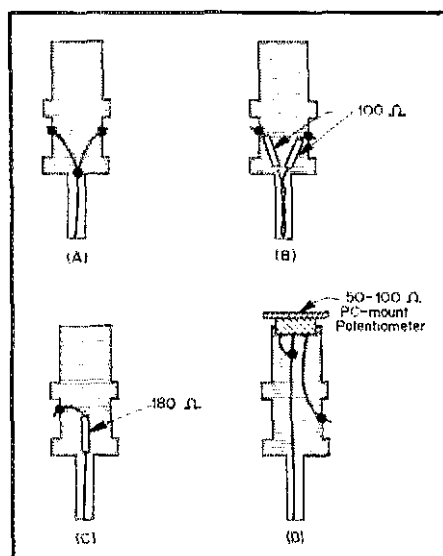


Рис. 2 - Пояснение конструкции резистивных нагрузок для проверки и калибровки моста. Каждая нагрузка размещена внутри разъема PL-259. (Показано поперечное сечение только тела PL-259; часть разъема не показана.) Выводы должны быть как можно короче для минимизации паразитной индуктивности. (A) - короткозамкнутая нагрузка; (B) - 50-Ω нагрузка; (C) - 180-Ω нагрузка; (D) - нагрузка с переменным сопротивлением, используемая для определения потерь в коаксиальном кабеле.

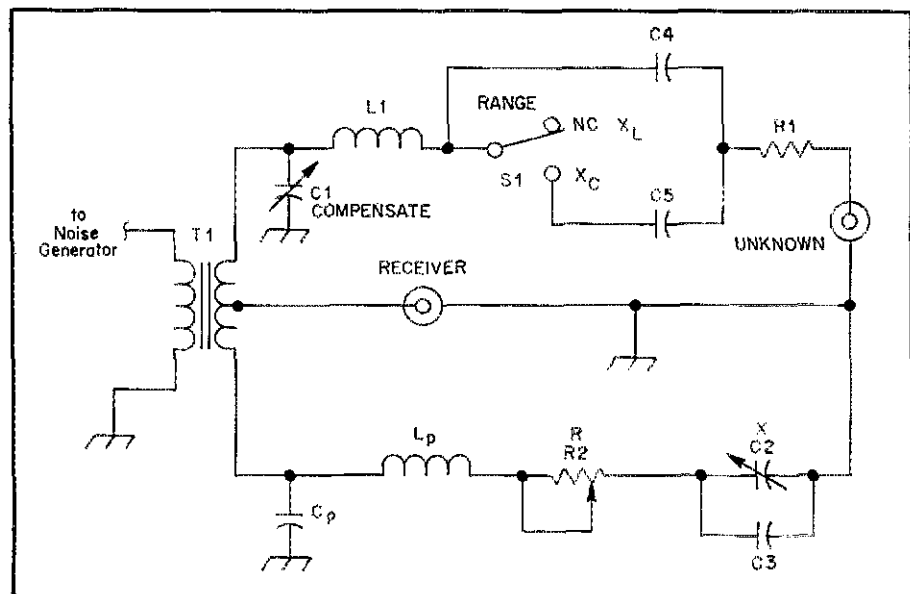


Рис.3 - Схема модернизированного шумового моста. Я переделал свой шумовой мост по этой схеме. Переменный резистор (R2) и переменная конденсатор (C2) оставлены от старого моста. Паразитная емкость и индуктивность резистора R2 показаны на схеме как Cp и Lp.

Список деталей:

- C1 - 2-8 пФ подстроечный; см. текст.
- C2 - 15-150 пФ переменный.
- C3 - 20 пФ слюдяной.
- C4 - 47 пФ слюдяной.
- C5 - 82 пФ слюдяной.
- L1 - проволочная петля; см. текст

- R1 - 10 Ω, 0.25 Вт.
- R2 - 250 Ω, безиндуктивный потенциометр.
- S1 - тумблер.
- T1 - каждая обмотка состоит из 3-х витков изолированного одножильного провод на ферритовом сердечник Amidon BLN-43-2402. См. Рис. 4

та показана на Рис.3. Я переделал мой шумовой мост по этой схеме, но таким же образом можно доработать и другие шумовые мосты.

Главная причина частотной зависимости нуля моста - это конструкция трансформатора (Т1 на Рис.1). Конструкции, которые я встречал, были намотаны тремя скрученными проводами на кольце из феррита или порошкового железа. Такая конструкция вызывает смещение фазы во вторичных обмотках трансформатора на высоких частотах, что является причиной изменения с частотой реактивного сопротивления моста. Некоторые трансформаторы также имеют недостаточную проницаемость сердечника; это вызывает изменение активного сопротивления моста на низких частотах.

Обе эти проблемы могут быть решены, если применить ферритовый сердечник в виде "бинокля" с намоткой, как показано на Рис.4. Таким трансформатором на "бинокле" необходимо заменить торроидальный трансформатор моста. Такая конструкция устраняет сдвиг фазы и изменение сопротивления на низких частотах.

Паразитная емкость

После того, как я установил трансформатор на "бинокле" в своем шумовом мосте, я обнаружил еще одну проблему, которая вызвана паразитной емкостью. Паразитная емкость в плече, где стоит переменный резистор моста, больше, чем в плече с неизвестной реактивностью, прежде всего потому, что паразитная емкость переменного резистора R_v сравнительно высока. Эта емкость обозначена на Рис.3 как C_p .

Влияние C_p проще всего обнаружить, используя нагрузку 180Ω . Подключите эту нагрузку к разъему UNKNOWN, настройте приемник на самую низкую рабочую частоту моста и сбалансируйте мост. Измерьте омметром сопротивление переменного резистора моста. Если это сопротивление больше, чем измеренное омметром сопротивление нагрузки 180Ω плюс резистор R_s , значит в плече моста, содержащем переменный резистор, присутствует паразитная емкость. Величина паразитной емкости может быть рассчитана по формуле

$$C_p = C_s \left(\sqrt{\frac{R_v}{R_L + R_s}} - 1 \right) \quad (\text{Eq 4})$$

где

R_L = сопротивление нагрузки (в данном случае 180Ω)

R_v = сопротивление переменного резистора

C_s = последовательная емкость

Эту паразитную емкость можно

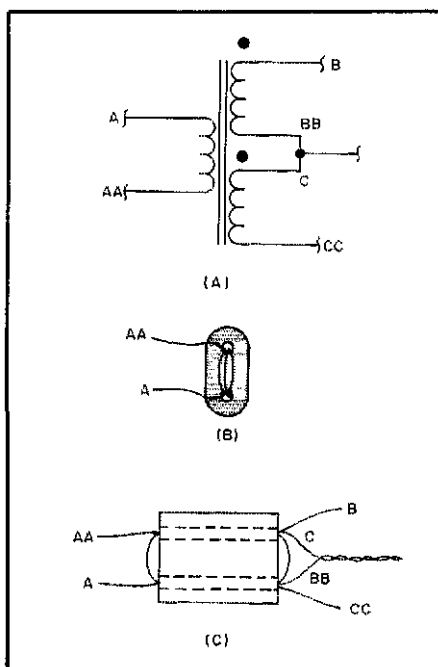


Рис. 4. - детали конструкции трансформатора. А - Схема соединения обмоток трансформатора. В и С - вид с торца и вид сбоку, соответственно. Трансформатор намотан на ферритовом сердечнике Amidon BLN 43-2402. Каждая обмотка - три витка провода номер 30 в эмалированной изоляции. Один виток равен одному проходу провода через оба отверстия в ферритовом сердечнике. Первичная обмотка должна начинаться с одной стороны трансформатора, а вторичные - с другой стороны.

скомпенсировать, поместив переменный конденсатор ($C1$ на Рис.3) в плече моста с неизвестной реактивностью. (Если требуемая емкость компенсационного конденсатора всего лишь несколько пФ, вы можете использовать конденсатор, сделанный из двух коротких скрученных кусочков изолированного одножильного провода). Для подбора емкости этого конденсатора, установите сопротивление переменного резистора R_v (измеренное омметром), равным сопротивлению нагрузки 180Ω плюс резистор R_s (также измеренные омметром). Затем установите "0" на шкале переменного конденсатора моста и подбирайте емкость компенсационного конденсатора (изменением его длины) до получения баланса моста. Подбор конденсатора необходимо производить на нижней рабочей частоте моста. Для балансировки моего моста потребовался конденсатор емкостью 7.5 пФ.

Паразитная индуктивность

Второй нежелательный эффект вызывается паразитной индуктивностью переменного резистора, показанной на Рис.3 как L_p . Вы можете обнаружить эту паразитную индуктивность, поместив короткозамкнутую нагрузку к разъему UNKNOWN и измеряя реактивное сопротивление на самой низкой и самой высокой

рабочей частоте моста; реактивное сопротивление должно быть одно и то же на обеих частотах. Если реактивное сопротивление уменьшается при увеличении частоты, значит переменный резистор имеет паразитную индуктивность, и компенсационную индуктивность нужно поместить в плечо с неизвестным импедансом. Если реактивное сопротивление увеличивается с частотой, значит дополнительная индуктивность находится в плече с неизвестным импедансом, и компенсационную индуктивность нужно поместить в плечо с переменным резистором.

Паразитная индуктивность, если она присутствует, должна иметь величину порядка нескольких десятых наногенри, что составляет несколько Ом на частоте 30 МГц.

Паразитная индуктивность компенсируется установкой катушки из одного витка провода длиной $25-50$ мм, установленного в нужном плече моста. Изменяйте размер этой катушки до тех пор, пока реактивная составляющая будет постоянной во всем диапазоне рабочих частот моста. Для балансировки моего моста потребовался один виток из провода номер 26 длиной 30 мм, помещенный в плечо с неизвестной реактивностью.

Предел измерения реактивности

Предел измерения реактивности шумовым мостом зависит от нескольких факторов, включая рабочую частоту, величину последовательно включенного конденсатора ($C4/C5$ на Рис. 3), и емкость переменного конденсатора (C_v на Рис. 1). Например, на частоте 10 МГц, диапазон измерения реактивного сопротивления моим мостом до переделки был от минус 800Ω до 130Ω . Четко видно смещение в сторону емкости. Я проверял диапазон измерения реактивного сопротивления и на других конструкциях.³

Вы можете определить диапазон реактивных сопротивлений, которые должен замерять ваш шумовой мост, исходя из максимальной величины КСВ, которую вы хотите измерять мостом. Я хотел, чтобы мой мост был способен измерить КСВ $5:1$ на нагрузке 50Ω и частоте 30 МГц. Чтобы сделать это, мост должен охватывать диапазон активного сопротивления от 5 до 250Ω и диапазон реактивного сопротивления от -120Ω до 120Ω . На частоте 10 МГц это эквивалентно диапазону реактивных сопротивлений от -360 до 360Ω . Этот диапазон измерений почти достигается в конструкции, показанной на Рис. 3. (Диапазоны измерения активного и реактивного сопротивлений после модернизации составляют от 0 до 220Ω и от -400 до 230Ω соответственно, на час-

тоте 10 МГц. Ошибка измерения, я полагаю, составляет $\pm 5\Omega$ [т.е. 10% импеданса].)

Конденсатор емкостью 20 пФ параллельно с C2 ограничивает диапазон изменения емкости C2. Я добавил переключатель RANGE чтобы расширять предел измерения реактивного сопротивления в сторону емкости или индуктивности. Точка нулевого реактивного сопротивления получается при почти максимальной или минимальной емкости C2. Переключатель RANGE почти удваивает предел измерения реактивного сопротивления.

Я установил переключатель на задней стенке моего моста, около разъема UNKNOWN. Я также увеличил размер шкал моста чтобы увеличить точность считывания значений сопротивления.

Калибровка

Для получения хорошей точности мостовых измерений необходима точная калибровка. Калибровка шкалы активного сопротивления непосредственная. Чтобы произвести калибровку, настройте приемник на частоту вблизи середины рабочего диапазона моста; обычно это примерно 10 МГц. Подсоедините короткозамкнутую нагрузку к разъему UNKNOWN и сбалансируйте мост. Это - точка нулевого активного сопротивления, отметьте ее на шкале. Остальную часть шкалы активного сопротивления калибруют, используя точный омметр и измеряя сопротивление переменного резистора R2, а затем отмечая значение измеренного сопротивления на шкале; я откалибровал шкалу с шагом в 10Ω.

Калибровка шкалы реактивного сопротивления зависит от того, как вы хотите считывать реактивное сопротивление моста. Большинство опубликованных методов калибровки обеспечивают измерение реактивного сопротивления в терминах емкости. Однако мой метод обеспечивает калибровку шкалы реактивности в *Омах*, на базовой частоте 10 МГц. Преимущество этого метода состоит в том, что он дает результат в единицах, которые являются наиболее уместными при измерении импеданса. Неудобство этого метода в том, что значение необходимо пересчитывать, если частота измерений отличается от 10 МГц. Формула для пересчета следующая:

$$X_u(f) = X_{u10} \frac{10}{f} \quad (\text{Eq 5})$$

где

f = частота в МГц

X_{u10} = неизвестное реактивное сопротивление на частоте 10 МГц

Мой метод калибровки шкалы

реактивного сопротивления требует наличия только куска короткозамкнутого коаксиального кабеля, который служит эталоном реактивного сопротивления. (Реактивное сопротивление куска короткозамкнутого коаксиального кабеля с низкими потерями зависит только от длины кабеля, частоты измерения и характеристического волнового сопротивления кабеля). Чтобы калибровать свой мост, я использовал кабель Radio Shack® RG-8M, потому что он повсеместно доступен, имеет относительно низкие потери и имеет почти полностью активное характеристическое волновое сопротивление.

Далее описана калибровка шкалы реактивного сопротивления, шаг за шагом:

1) Отрежьте кусок коаксиального кабеля длиной чуть больше $\frac{1}{4} \lambda$ ($246V_p \div f$ МГц; это приблизительно 20 футов (или 6.1 м) для RG-8M). Подсоедините разъем PL-259 к одному концу кабеля; оставьте другой конец не замкнутым. Этот кабель будет использоваться как эталон для калибровки шкалы реактивного сопротивления.

2) Присоедините короткозамкнутую нагрузку к разъему UNKNOWN шумового моста и установите частоту приемника равной 10 МГц. Сбалансируйте шумовой мост. Не трогайте ручку реактивного сопротивления после того, как сбалансировали мост.

3) Подключите калибровочный кабель к гнезду UNKNOWN моста. Сбалансируйте мост, перестраивая только частоту приемника и вращая переменный резистор. После нахождения баланса частота настройки приемника должна быть менее 10МГц; если она больше 10 МГц - кабель слишком короткий и вам необходимо приготовить новый, длиннее.

4) Постепенно укорачивайте с конца коаксиальный кабель, пока не получите баланс моста точно на 10 МГц, вращая только переменный резистор со шкалой активного сопротивления. Затем накоротко соедините центральную жилу с оплеткой на конце кабеля. Проверьте, что мост балансируется на частоте 20 МГц при установке шкалы реактивного сопротивления на «0». Мой калибровочный кабель оказался длиной 18 футов и 2 дюйма.

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

$$X_{i10} = R_0 \frac{f}{10} \tan \left(2\pi \frac{f}{40} \right) \quad (\text{Eq 6})$$

где

X_{i10} = реактивное сопротивление кабеля на 10 МГц

R_0 = характеристическое сопротивление коаксиального кабеля

f = частота в МГц

Для Radio Shack RG-8M R_0 составляет 52.5 Ω. (Замечание: все тригонометрические функции задаются в радианах.)

Ошибка при расчете по формуле Eq 6 составляет менее 5% для сопротивлений менее 500Ω, при условии, что потери в измерительном кабеле не превышают 0.2 дБ. Эта ошибка становится существенно меньше для меньших реактивных сопротивлениях (ошибка 2% для 300 Ω при потерях 0.2 дБ в кабеле). Потери в 18 футах кабеля RG-8M составляют 0.13 дБ на 10 МГц. Данные при использовании Radio Shack® RG-8M приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Данные для калибровки шумового моста:

Метод коаксиального кабеля

Эти данные - для кабеля Radio Shack RG-8M длиной точно $\frac{1}{4} \lambda$ на частоте 10 MHz; реактивное сопротивление приведено для этой частоты.

X_j (10 МГц)	Частота (МГц)	X_j (10 МГц)	Частота (МГц)
10	3.318	-10	19.376
20	4.484	-20	18.722
30	5.262	-30	18.048
40	5.838	-40	17.368
50	6.288	-50	16.701
60	6.647	-60	16.063
70	6.943	-70	15.472
80	7.192	-80	14.936
90	7.404	-90	14.461
100	7.587	-100	14.045
110	7.746	-110	13.683
120	7.885	-120	13.369
130	8.009	-130	13.097
140	8.119	-140	12.861
150	8.217	-150	12.654
160	8.306	-160	12.473
170	8.397	-170	12.313
180	8.460	-180	12.172
190	8.527	-190	12.045
200	8.588	-200	11.932
210	8.645	-210	11.831
220	8.697	-220	11.739
230	8.746	-230	11.655
240	8.791	-240	11.579
250	8.832	-250	11.510
260	8.872	-260	11.446
270	8.908	-270	11.387
280	8.942	-280	11.333
290	8.975	-290	11.283
300	9.005	-300	11.236
350	9.133	-350	11.045
400	9.232	-400	10.905
450	9.311	-450	10.798
500	9.375	-500	10.713

6) Настройте приемник на соответствующую частоту для нужного реактивного сопротивления (данные из Таблицы 1 или рассчитанные по формуле Eq 6). Сбалансируйте мост, используя регуляторы активного и реактивного сопротивлений. Отметьте на шкале реактивное сопротивление. Повторите 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 больше 100Ω при больших значениях реактивного сопротивления.

Этот метод калибровки намного более точен, чем метод подключения конденсаторов постоянной емкости к разъему UNKNOWN. Используя этот метод, вы можете откалибровать шумовой мост менее чем за час.

Измерение параметров коаксиального кабеля при помощи шумового моста.

Коаксиальные кабели имеют ряд характеристик, которые влияют на передачу сигналов по ним. Радиолобителей главным образом интересуют ослабление кабеля и характеристическое волновое сопротивление. Однако, если вы планируете использовать шумовой мост для измерения импеданса антенны, вы должны точно определить не только импеданс и ослабление кабеля, но также и его электрическую длину. К счастью, все эти параметры легко измерить при помощи модифицированного шумового моста.

Первый параметр, который вы должны измерить - электрическая длина кабеля. Имеется множество путей выражения электрической длины кабеля, наиболее используемым является длина кабеля в градусах на данной частоте. Мы выразим длину кабеля через частоту, на которой по длине кабеля размещается одна волна. Эта длину назовем f_λ . Следуйте приведенным ниже указаниям, чтобы определить f_λ для коаксиального кабеля:

1) Настройте приемник на интересующую вас частоту (f_λ слегка изменится с частотой, поэтому настраивайтесь как можно ближе к нужной вам частоте). Подсоедините короткозамкнутую нагрузку к разъему UNKNOWN шумового моста и сбалансируйте мост.

2) Отсоедините дальний конец коаксиального кабеля от нагрузки (антенны) и подключите короткозамкнутую нагрузку вместо этой нагрузки. Подключите ближний конец кабеля к разъему UNKNOWN моста.

3) Изменяйте частоту приемника и вращайте регулятор активного со-

противления моста до получения баланса моста. *Не трогайте регулятор реактивного сопротивления шумового моста в течение этой процедуры.* Запомните частоту, на которой найден баланс моста; назовем ее f_n . Активное сопротивление при балансе должно быть относительно небольшим (меньше 20Ω).

4) Перестраивайте приемник вверх по частоте, пока не найдете следующий баланс моста. Подстройте регулятор активного сопротивления, если нужно, для более точной балансировки; *но не трогайте регулятор реактивного сопротивления.* Обратите внимание на частоту, на которой найден второй баланс моста; это будет - (f_{n+2}).

5) Теперь мы можем найти значение n и электрическую длину кабеля. (После вычислений округлите n до ближайшего целого числа)

$$n = \frac{2 f_n}{f_{n+2} - f_n} \quad (\text{Eq 7})$$

$$f_\lambda = \frac{4 f_n}{n} \quad (\text{Eq 8})$$

Эту процедуру можно выполнить и с разомкнутым на конце коаксиальным кабелем. Однако краевые эффекты на незакороченном PL-259 увеличивают эффективную длину коаксиального кабеля, что приводит к занижению f_λ . Если вы будете использовать данную процедуру с разомкнутым на конце коаксиальным кабелем, то n будет нечетным.

Характеристическое сопротивление коаксиального кабеля определяют, измеряя его полное входное сопротивление на двух частотах, отстоящих на $f_\lambda/4$. Измерение производится, когда на конце кабеля включена резистивная нагрузка. Характеристическое сопротивление медленно изменяется с частотой, поэтому измерение нужно производить вблизи интересующей вас частоты. Процедура измерения следующая:

1) Подключите 50-Ω нагрузку к дальнему концу коаксиального кабеля и подключите ближний конец кабеля к разъему UNKNOWN шумового моста. (Ошибка измерения минимальна, когда сопротивление нагрузки близко к характеристическому сопротивлению кабеля. По этой причине используется 50-Ω нагрузка.)

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

3) Увеличьте частоту приемника

точно до $f_\lambda/4$. Снова сбалансируйте мост и запишите полученные значения сопротивлений как $R(f + f_\lambda/4)$ и $X(f + f_\lambda/4)$.

4) Вычислите характеристическое сопротивление коаксиального кабеля, используя формулы Eq 9 - Eq 14. Для этого вам не помешает "научный" калькулятор.

$$R = \frac{R(f) \times R(f + f_\lambda/4) - X(f) \times X(f + f_\lambda/4)}{X(f) \times R(f + f_\lambda/4) + R(f) \times X(f + f_\lambda/4)} \quad (\text{Eq 9})$$

$$X = \frac{R(f) \times X(f + f_\lambda/4) + X(f) \times R(f + f_\lambda/4)}{X(f) \times R(f + f_\lambda/4) + R(f) \times X(f + f_\lambda/4)} \quad (\text{Eq 10})$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{Eq 11})$$

$$R_0 = \sqrt{Z} \cos \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{X}{R} \right] \right) \quad (\text{Eq 12})$$

$$X_0 = \sqrt{Z} \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{X}{R} \right] \right) \quad (\text{Eq 13})$$

$$Z_0 = R_0 + j X_0 \quad (\text{Eq 14})$$

Измерив характеристики коаксиальных кабелей разных типов, я нашел, что при номинале 50Ω кабели имеют активную часть характеристического сопротивления от 45 до 60 Ω и реактивную часть от -2 до -10Ω.

Теперь можно измерить потери в кабеле, так как известны электрическая длина кабеля и его характеристическое сопротивление. Следующая методика позволяет измерить потери в кабеле на отрезке длиной $f_\lambda/4$ на заданной частоте. Потери между точками измерения могут быть интерполированы с разумной точностью. Эта методика использует метод замены резистора и обеспечивает намного лучшую точность измерения, чем при непосредственном считывании сопротивления со шкалы шумового моста.

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

$$f = n \times f_\lambda/4 \quad (\text{Eq 15})$$

где n - любое положительное целое число.

2) Если n нечетное, оставьте дальний конец коаксиального кабеля не замкнутым; если n четное, подключите короткозамкнутую нагрузку к дальнему концу кабеля. Подсоедините ближний конец кабеля к разъему UNKNOWN моста.

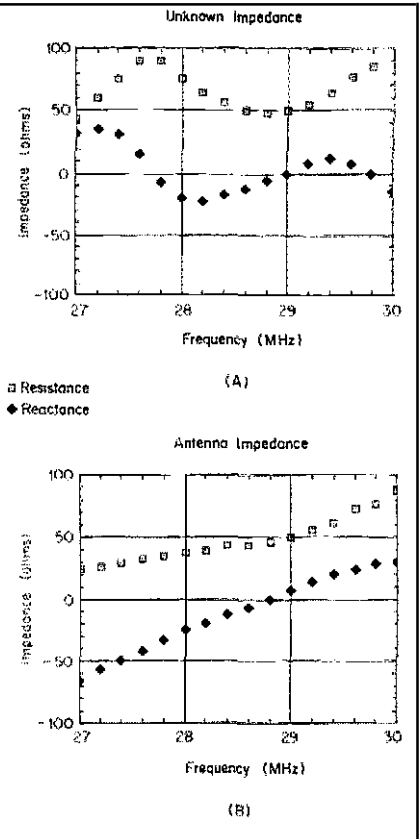
3) Установить на шумовом мосту нулевое реактивное сопротивление. Перестраивая частоту приемника и вращая регулятор активного сопротивления моста, добейтесь полного баланса моста.

4) Подключите нагрузку с переменным сопротивлением к гнезду UNKNOWN моста. Не трогая регулятор активного сопротивления мо-

Таблица 2
Импеданс антенны "inverted V"

Freq (MHz)	R_u (ohms)	X_u @ 10 MHz (ohms)	X_u (ohms)	R_i (ohms)	X_i (ohms)
27.0	44	85	31.5	24	-65
27.2	60	95	34.9	26	-56
27.4	75	85	31.0	30	-51
27.6	90	40	14.5	32	-42
27.8	90	-20	-7.2	35	-34
28.0	75	-58	-20.7	38	-24
28.2	65	-65	-23.0	40	-19
28.4	56	-52	-18.3	44	-12
28.6	50	-40	-14.0	44	-6
28.8	48	-20	-6.9	47	1
29.0	50	0	0.0	52	8
29.2	55	20	6.8	57	15
29.4	64	30	10.2	63	21
29.6	78	20	6.8	75	26
29.8	85	0	0	78	30
30.0	90	-50	-16.7	89	33

Рис. 5 - Графики импеданса антенны "inverted V", рассчитанной для частоты 29 МГц. На графике А показан импеданс антенны на конце коаксиального кабеля Columbia 1188 длиной 74 фута, измеренный при помощи шумового моста. На графике В показан импеданс антенны в точке запитки (пересчитан с использованием уравнения длинной линии для исключения влияния питающего кабеля).



ста, изменяйте сопротивление резистора нагрузки и реактивное сопротивление моста до получения баланса.

5) Отключите нагрузку с переменным сопротивлением от гнезда UNKNOWN и измерьте омметром (имеющим хорошую точность измерения низких сопротивлений) сопротивление резистора нагрузки. Измеренное сопротивление будет R_j .

6) Вычислите потери в кабеле (в децибелах)

$$\alpha l = 8.69 \frac{R_i}{R_0} \quad (\text{Eq 16})$$

Для примера, давайте вычислим параметры кабеля Columbia 1188 длиной 74 фута (аналог кабеля RG-58). Вычисления будем производить на частоте вблизи 10-метрового диапазона.

С короткозамкнутой нагрузкой на конец кабеля мы находим баланс моста на частотах 24.412 и 29.353 МГц. Это соответствует n равному 10 и f_λ 9.765 МГц на 24.412 МГц, и f_λ 9.784 МГц на 29.353 МГц. С нагрузкой 50Ω на дальнем конце кабеля по результатам измерений находим следующие значения активного и реактивного сопротивлений, на центральной частоте 28 МГц:

$$f = 26.777 \text{ МГц}$$

$$R(f) = 64\Omega$$

$$X(f) = -22\Omega$$

$$f + f_\lambda/4 = 29.223 \text{ МГц}$$

$$R(f + f_\lambda/4) = 50\Omega$$

$$X(f + f_\lambda/4) = -24\Omega$$

это соответствует импедансу

$$R_0 = 56.6 \Omega$$

$$X_0 = -8.3 \Omega$$

$$Z_0 = 56.6 - j8.3 \Omega$$

Входное активное сопротивление кабеля составляет 12.1Ω на частоте 29.353 МГц с короткозамкнутой на-

грузкой на дальнем конце кабеля; это соответствует потерям 1.85 дБ.

Использование шумового антенного моста для измерения импеданса антенны.

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

1) Замеры можно сделать, подключив шумовой мост непосредственно к антенне. Это обычно не практикуется, потому что для правильного измерения антенна должна находиться на рабочей высоте. Конечно, это очень неудобно.

2) Измерения можно произвести на конце коаксиального кабеля - если длина кабеля точно кратна целому числу длин полуволн. Это означает измерение на одной единственной частоте. Измерение импеданса антенны в пределах радилюбительских диапазонов при использовании этого метода дает существенную ошибку.

3) Измеренные данные можно скорректировать, используя диаграмму Смита, как описано в *The ARRL Antenna Book*⁴. Этот графический метод может помочь оценить импеданс антенны - при условии, что КСВ не слишком высок и потери в кабеле также не очень высоки. 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 измерения.

4) Наконец, измерения можно скорректировать, используя уравнение линии передачи, как описано в Приложении. Уравнение линии передачи можно решить, используя "научный" калькулятор, но это доволь-

но утомительно, если рассчитывать данные для нескольких частот. Лучше для расчетов использовать программируемый калькулятор или персональный компьютер. (У меня есть программа на языке BASIC для калькулятора HP-41C. Вы ее можете получить от меня, прислав SASE.) Я полагаю, что это - лучший метод для вычисления импеданса антенны по измеренным параметрам. Его неудобство в том, что вам заранее требуется измерить некоторые характеристики линии передачи, для чего вы должны иметь доступ к обоим концам линии передачи.

Для определения импеданса антенны сначала необходимо измерить электрическую длину, характеристическое волновое сопротивление и ослабление коаксиального кабеля, который будет подключен к антенне. После проведения этих измерений подсоедините коаксиальный кабель к антенне и измерьте полное входное сопротивление кабеля на нескольких частотах в рабочем диапазоне частот антенны. Затем используйте эти измерения в уравнении линии передачи чтобы определить фактический импеданс антенны на каждой из частот.

Таблица 2 и Рис. 5 иллюстрируют пример такого расчета. Была использована антенна "inverted V" 10-ти метрового диапазона с высотой подвеса примерно 30 футов. Лучи антенны расположены под углом 120°, длина каждого луча 8 футов из провода номер 14. Линия питания - описанный выше кусок кабеля Columbia 1188 длиной 74 фута.

Посмотрим на Рис. 5А. Из этого графика замеров импеданса кабеля очень трудно сказать что-либо относительно антенны. Активное и реактивное сопротивления существенно изменяются в частотном диапазоне, и кажется, что антенна резонирует на частотах 27.7, 29.0 и 29.8 МГц.

На Рис. 5В показан истинный импеданс антенны. Этот график был получен из предыдущего с использованием уравнения линии передачи. Теперь видно, что истинные активное и реактивное сопротивления антенны гладко увеличиваются с частотой. Антенна резонирует на 28.8 МГц, сопротивление излучения в точке резонанса 47Ω. Примерно так и должна себя вести “inverted V”.

При выполнении измерений нужно быть внимательным, чтобы не допустить ошибок при измерении. Такие ошибки приведут к большому искажению после перерасчета. Эта проблема наиболее существенна, когда длина линии передачи кратна нечетному числу четвертей длины волны и при большом ослаблении и/или КСВ. Если небольшие изменения в полном входном сопротивлении или характеристиках линии передачи приводят к большим изменениям в сопротивлении антенны - вероятно, вы ошиблись при измерении. Чтобы свести ошибки к минимуму, лучше всего использовать линию передачи с длиной, кратной целому числу полуволн.

Заключение

В этой статье я рассказал, как существенно увеличить точность шумового антенного моста и как использовать мост для измерения характеристик коаксиального кабеля, а также измерять импеданс СВ, КВ и УКВ антенн. При помощи шумового моста можно даже измерять импеданс радиоэлементов. Например, мой модернизированный шумовой мост имеет чувствительность, достаточную, чтобы измерить индуктивность провода длиной 1 дюйм на частоте 30 МГц.

Список литературы

- 1 B. Hale, ed. *The 1989 ARRL Handbook* (Newington: ARRL, 1988). pp 2-22 through 2-29
- 2 L. Wolfgang, ed. *The ARRL Extra Class License Manual*, 3rd ed (Newington: ARRL, 1988), Chapter 5.
- 3 U. Belrose, “RX Noise Bridges,” QST, May 1988, pp 34-35, 39.
- 4 Q. Hall, ed. *The ARRL Antenna Book*, 5th ed. (Newington: ARRL, 1988). Chapter 28.
- 5 S. Ramo, J. Whinnery and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, Jan 1967, Chapter 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Преобразование импеданса, выз-

ванное линией передачи, может быть найдено или графически (используя диаграмму Смита), или путем расчета (используя уравнение линии передачи). Линия передачи может быть как двухпроводной линией, так и коаксиальным кабелем. С появлением персональных компьютеров проще и точнее найти преобразование импеданса путем расчетов.

Преобразование импеданса линией передачи дано в⁵

$$Z_i = Z_0 \left(\frac{Z_L \cosh(\gamma l) + Z_0 \sinh(\gamma l)}{Z_0 \cosh(\gamma l) + Z_L \sinh(\gamma l)} \right) \quad (\text{Eq 17})$$

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

γ = комплексная константа распространения ($\gamma = \alpha + j\beta$)

α = постоянная затухания, в неперах на единицу длины (1 непер = 8.69 дБ)

β = фазовая постоянная, в радианах на единицу длины

Импедансы и константа распространения являются комплексными числами. Комплексные гиперболический синус и косинус могут быть найдены по формулам

$$\sinh(\alpha l + j\beta l) = \cosh(\beta l) \sinh(\alpha l) + j \sin(\beta l) \cosh(\alpha l) \quad (\text{Eq 18})$$

$$\cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh(\alpha l) \cosh(\beta l) + j \sin(\beta l) \sinh(\alpha l) \quad (\text{Eq 19})$$

$$\sinh(\alpha l) = \frac{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}{2} \quad (\text{Eq 20})$$

$$\cosh(\alpha l) = \frac{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}}{2} \quad (\text{Eq 21})$$

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

$$Z_i = Z_0 \left(\frac{Z_L \cosh(\gamma l) - Z_0 \sinh(\gamma l)}{Z_0 \cosh(\gamma l) - Z_L \sinh(\gamma l)} \right) \quad (\text{Eq 22})$$

Большинство измерений производится при неизменной длине коаксиального кабеля. Поэтому мы будем считать, что αl 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. Фазовая постоянная может быть выражена как функция частоты и длины линии передачи:

$$\beta l = 2\pi \frac{f}{f_\lambda} \quad (\text{Eq 23})$$

где

f = рабочая частота

f_λ = частота, на которой линия передачи имеет электрическую длину, равную 1λ .

Для нахождения f_λ используется короткозамкнутая линия передачи. Чтобы сделать это, найдите частоту, на которой линия передачи имеет нулевое реактивное сопротивление и низкое активное сопротивление (меньше, чем характеристическое сопротивление линии передачи). Мы назовем эту частоту f_n . Увеличивайте частоту, пока не найдете следующую точку с нулевым реактивным сопротивлением. Мы назовем ее f_{n+2} . (n показывает число четвертей длины волны, которые укладываются на линии передачи; n - всегда целое число.)

$$n = \frac{2 f_n}{f_{n+2} - f_n} \quad (\text{Eq 24})$$

where $n = 2, 4, 6, \dots$

$$f_\lambda = \frac{4 f_n}{n} \quad (\text{Eq 25})$$

Расчет f_λ по Eq 25 предполагает, что линия передачи имеет чисто активное характеристическое волновое сопротивление. На самом деле это не так, но получаемый по Eq 25 результат достаточно точен; ошибка составляет меньше 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. Хороший коаксиальный кабель имеет очень маленькую реактивную компоненту характеристического волнового сопротивления (порядка нескольких Ом). Легче всего найти характеристическое волновое сопротивление кабеля можно, 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

$$Z_i(f) = Z_0 \left(\frac{Z_L \cosh(\gamma l) + Z_0 \sinh(\gamma l)}{Z_0 \cosh(\gamma l) + Z_L \sinh(\gamma l)} \right) \quad (\text{Eq 26})$$

$$Z_i(f + f_\lambda/4) =$$

$$Z_0 \left(\frac{Z_L \sinh(\gamma l) + Z_0 \cosh(\gamma l)}{Z_0 \sinh(\gamma l) + Z_L \cosh(\gamma l)} \right) \quad (\text{Eq 27})$$

Используя Eqs 26 и 27, можно найти характеристическое волновое сопротивление по формуле

$$Z_0 = \sqrt{Z_i(f) Z_i(f + f_\lambda/4)} \quad (\text{Eq 28})$$

В данном выражении квадратный корень является комплексным и может быть посчитан на научном калькуляторе, используя формулы Eqs c

$$Z = R + jX = Z_0(f)Z_0(f + f_0/4) \quad (\text{Eq 29})$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{Eq 30})$$

$$R_0 = \sqrt{|Z|} \cos\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{X}{R}\right]\right) \quad (\text{Eq 31})$$

$$X_0 = \sqrt{|Z|} \sin\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{X}{R}\right]\right) \quad (\text{Eq 32})$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (\text{Eq 33})$$

Ослабление линии передачи можно рассчитать, используя данное уравнения импеданса линии передачи:

$$Z_i = Z_0 \frac{\left\{ \frac{Z_L[\cos(\beta l) + j\alpha l \sin(\beta l)]}{Z_0[\cos(\beta l) + j\alpha l \sin(\beta l)]} + Z_0[\alpha l \cos(\beta l) + j \sin(\beta l)] \right\}}{\left\{ Z_L[\alpha l \cos(\beta l) + j \sin(\beta l)] \right\}} \quad (\text{Eq 34})$$

Это уравнение дает ошибку менее 5% при условии, что потери в линии передачи составляют не более 3 dB. Если длина линии передачи кратна нечетному количеству четвертей длины волны ($n = 1, 3, 5, \dots$) и открыта на конце, или если длина линии передачи кратна четному количеству четвертей длины волны ($n = 2, 4, 6, \dots$) и короткозамкнута на конце, то полное входное сопротивление будет

$$Z_i = \alpha l Z_0 \quad (\text{Eq 35})$$

Ослабление такой линии передачи может быть найдено по формуле

$$\alpha l = \frac{R_i}{R_0} \quad (\text{Eq 36})$$

Где R_i и R_0 - активные части полного входного сопротивления и характеристического волнового сопротивления, соответственно. Ослабление линии передачи увеличивается с частотой. Оценить это ослабление можно, используя уравнение

$$\alpha(f) = \alpha(f_0) \left(\frac{f}{f_0}\right)^\sigma \quad (\text{Eq 37})$$

где

$$0.5 < \sigma < 1$$

Это уравнение можно использовать, чтобы интерполировать неизмеренные величины ослабления. Для большинства коаксиальных кабелей подходит значение $\sigma = 0.5$.