

УДК 621.396.67

## МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ПОДЗЕМНЫХ АНТЕНН

**М.А. Бузова**, старший научный сотрудник филиала ФГУП НИИР – СониИР, к.ф.-м.н.; bma@soniir.ru

**И.А. Колояров**, заместитель начальника лаборатории филиала ФГУП НИИР – СониИР

**Ключевые слова:** подземные антенны, ДКМВ-диапазон, коэффициент усиления, коэффициент бегущей волны, методика оценивания.

Среди угроз современного глобального мира нельзя исключать возможность преднамеренного вывода из строя систем связи. Сегодня в большинстве стран, включая Россию, активно развиваются и модернизируются резервные системы коротковолновой связи, менее уязвимые по сравнению с системами связи других диапазонов. Очевидно, что наиболее защищенными антеннами ДКМВ-диапазона при прочих равных условиях являются подземные. Одна из основных задач резервной сети коротковолновой связи – поддержание таких антенн в постоянной готовности к работе, что, в свою очередь, требует регулярного контроля их состояния.

Общие вопросы обеспечения постоянной готовности защищенных антенн, особенности их эксплуатации и контролируемые антенные характеристики были рассмотрены в [1]. В настоящей работе предложены методики косвенного оценивания двух основных параметров – коэффициента усиления (КУ) и коэффициента бегущей волны (КБВ) подземных антенн.

**Методика оценивания коэффициента усиления.** В основе данного процесса лежит оценивание измеренного уровня сигнала, принимаемого исследуемой антенной. Именно это предусматривают методы, базирующиеся на принципе замещения. В общих чертах принцип замещения сводится к измерению уровня сигнала, принятых исследуемой и некоторой эталонной антенной, с последующим их сравнением и определением КУ исследуемой антенны относительно эталонной. Измерения эталонной антенны – операция довольно сложная и затратная. Поэтому в данной работе уровень эталонного сигнала предлагается определять расчетным путем на основе результатов измерений поля падающей волны.

Между тем предварительные исследования показали, что при известных параметрах падающей волны можно расчетным путем сразу определять КУ исследуемой антенны. Дело в том, что амплитуда падающей волны и уровень сигнала на выходе приемной антенны связаны между собой действующей длиной или апертурой антенны с учетом КПД. Если речь идет об эталонной антенне, то параметры падающей волны и антенны известны и нужно определить лишь уровень сигнала на выходе антенны. В случае же исследуемой антенны известен уровень сигнала на ее выходе, измеряемый так же, как и параметры падающей волны. Это позволяет найти параметры антенны, а в итоге – искомую величину КУ. На такой же основе разработана методика, предполагающая определение КУ с использованием испытательного сигнала стационарной радиостанции (радиоцентра), приходящего в точку приема в виде ионосферной волны.

На основе измерений на некоторой высоте над землей поля испытательного сигнала (от стационарной радиостанции) определяется амплитуда падающей волны. Предполагается, что полное поле вблизи земли есть суперпозиция падающей и отраженной волн. По экспериментальным данным

определяется поле падающей плоской волны. Параллельно измеряется уровень сигнала, принимаемого исследуемой антенной. Те и другие измерения проводятся многократно и проходят статистическую обработку. Затем расчетным путем находится искомое значение КУ. При этом учитываются тепловые потери в антенне и потери на отражение, обусловленные рассогласованием.

Измерение амплитуды падающей волны проводится в предположении, что отражение от земной поверхности может быть учтено с помощью коэффициентов Френеля [2]. Заметим, что в высокочастотном диапазоне это предположение, как правило, справедливо [3].

Далее находится среднее значение (оценка математического ожидания) напряженности поля  $E_{\text{изм}}$ :

$$E_{\text{изм}} = \frac{1}{N_{\text{изм}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{изм}}} 10^{0,05(u_i+Q)-6}, \quad (1)$$

где  $u_i$  – показания прибора;  $Q$  – коэффициент калибровки.

Аналогичным образом выполняются многократные измерения напряжения сигнала, принятого исследуемой антенной, и определяется среднее значение напряжения  $U_{\text{изм}}$ , рассчитываемое по формуле (1) при  $Q=0$ .

Определение амплитуды падающей ионосферной волны показано на рис. 1. Угол падения ионосферной волны равен  $\varphi$ , ее длина равна  $\lambda$ . При взаимодействии с земной поверхностью вдоль нее (по оси абсцисс) распространяется бегущая волна, по вертикали (по оси аппликат) – смешанная волна. Ниже будет показано, как измерение уровня поля на некоторой высоте  $H$  дает необходимую информацию о параметрах волнового процесса.

В ходе измерений определяется горизонтальная составляющая поля волны, что легко достигается горизонтальной ориентацией измерительной антенны с достаточной поляризационной развязкой.

Функцию, описывающую распределение горизонтально поляризованного поля, можно построить с использованием направляющих косинусов:

$$E(x, z) = E_0 F_x(x) F_z(z),$$

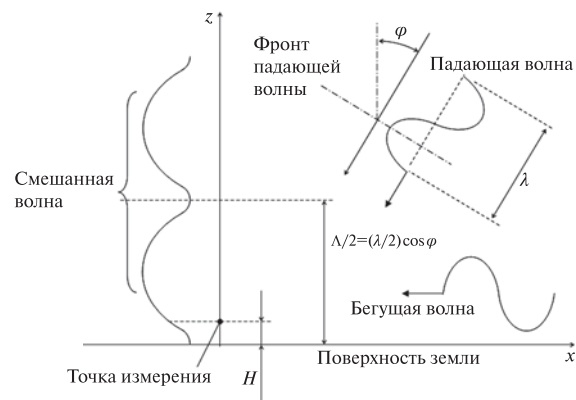


Рис. 1

где

$$F_x(x) = \exp[i\beta(\sin\varphi)x];$$

$$F_z(z) = \exp[i\beta(\cos\varphi)z] + \Gamma_{\parallel} \exp[-i\beta(\cos\varphi)z].$$

Заметим, что функция  $F_x(x)$  есть фазовый множитель, не влияющий на абсолютное значение поля. Следовательно, результаты измерений поля ( $E_{изм}$ ) зависят только от высоты точки наблюдения  $H$  и не зависят от  $x$ :  $E_{изм} = |E(x, H)| = E_0 |F_z(H)|$ . Поскольку функция  $F_z(z)$  известна, по измеренному значению  $E_{изм}$  можно найти амплитуду падающей волны  $E_0$ . Соответствующая формула имеет вид

$$E_0 = \frac{E_{изм}}{\left| \exp[i\beta(\cos\varphi)H] + \Gamma_{\parallel} \exp[-i\beta(\cos\varphi)H] \right|}.$$

Коэффициент Френеля  $\Gamma_{\parallel}$  вычисляется по формулам, вытекающим из известных [2] соотношений:

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{Z_c \cos\varphi - 120\pi C_t}{Z_c \cos\varphi + 120\pi C_t},$$

$$Z_c = \sqrt{\mu_0 / (\epsilon_a - i\sigma/\omega)}, \quad C_t = \sqrt{1 - \frac{\epsilon_0 \sin^2\varphi}{\epsilon_a - i\sigma/\omega}},$$

где  $\mu_0, \epsilon_0$  – магнитная и электрическая постоянные соответственно;  $\epsilon_a, \sigma$  – диэлектрическая проницаемость (абсолютная) и удельная проводимость земли соответственно;  $\omega$  – круговая частота;  $C_t$  – косинус угла преломления.

Косинус угла падения определяется соотношением [4]:

$$\cos\varphi = \frac{300}{\sqrt{9 \cdot 10^4 + R^2 / 4}},$$

где  $R$  – расстояние до источника испытательного сигнала (стационарной радиостанции), км.

Подземные антенны, как правило, предназначены для зонитного излучения (приема), а следовательно, для работы на относительно коротких трассах. Поэтому проверку их КУ целесообразно выполнять в том же режиме, т.е. при использовании в качестве источников испытательного сигнала радиостанций, удаленных на небольшие (100–400 км) расстояния.

Согласно [5], мощность, выделившаяся в нагрузку антенны с коэффициентом усиления  $G$ , равна

$$P = \frac{E_0^2 G \lambda^2}{30 \cdot 16\pi^2}.$$

С другой стороны, мощность  $P$  определяется измеренным напряжением  $U_{изм}$ :  $P = U_{изм}^2 / R_v$  ( $R_v$  – входное сопротивление прибора). Отсюда получаем окончательную формулу для определения КУ исследуемой подземной антенны:

$$G = 480\pi^2 \frac{U_{изм}^2}{\lambda^2 E_0^2 R_v}. \quad (2)$$

**Методика оценивания коэффициента бегущей волны.** Рассмотрим методику проверки согласования, суть которой заключается в следующем. Исследуемая антенна принимает некоторый сигнал, уровень которого измеряется на согласованной нагрузке. Перед нагрузкой в тракт включается специальное согласующее устройство, настройкой которого добиваются максимизации уровня измеряемого сигнала. Параметры настроенного согласующего устройства известны, и в них содержится вся необходимая информация об импедансных свойствах антенны.

Как известно, в режиме приема антенна может быть представлена в виде генератора с ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $Z_i$ ; при этом к генератору подключена фидерная

линия, нагруженная на ее волновое сопротивление  $W$ . Чтобы представить ту же антенну, но работающую на передачу, ЭДС нужно приложить справа, вместо нагрузки с сопротивлением  $W$ . Тогда нагрузкой линии будет  $Z_i$ , ею и определится КБВ. В частности, при  $Z_i = W$  коэффициент бегущей волны  $K$  будет равен 1. При этом в режиме приема напряжение на нагрузке линии  $W$  можно найти по формуле

$$U_2 = E \frac{W}{Z_i + W}. \quad (3)$$

Включим в линию согласующее устройство и настроим его на максимум напряжения на нагрузке линии  $W$ . Положим, что линия и согласующее устройство потерь не имеют. Тогда нагрузкой для генератора будет  $Z_i^*$ . Следовательно, для напряжения можем записать

$$U_1 = E'' \frac{W}{W + W}. \quad (4)$$

Теперь найдем напряжение на нагрузке  $U_1$ , для чего сначала определим ЭДС эквивалентного генератора  $E''$ . Поскольку потерь нет, мощности могут быть приравнены друг к другу:  $\frac{|E|^2}{2 \operatorname{Re}(Z_i)} = \frac{|E''|^2}{2W}$ . Тогда для модуля  $U_1$  запишем

$$|U_1| = \frac{1}{2} |E''| = \frac{|E|}{2} \sqrt{\frac{W}{\operatorname{Re}(Z_i)}}. \quad (5)$$

Отношение амплитуд напряжений на нагрузке  $W$  в режимах с согласованным согласующим устройством и без него с учетом (3)–(5) будет иметь вид

$$A = \frac{|U_1|}{|U_2|} = \frac{1}{2} \frac{|Z_i/W + 1|}{\sqrt{\operatorname{Re}(Z_i/W)}}. \quad (6)$$

Далее воспользуемся известной формулой связи входного сопротивления и коэффициента отражения от нагрузки:

$$Z_i = W \frac{1 + P_0 e^{-i\varphi}}{1 - P_0 e^{-i\varphi}}, \quad (7)$$

где  $P_0$  – модуль коэффициента отражения;  $j$  – фаза коэффициента отражения.

Подставив (7) в (6) и проведя ряд несложных преобразований, получим

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 - P_0^2}}.$$

Так как  $P_0 = \frac{1-K}{1+K}$ , после некоторых преобразований запишем окончательный результат:

$$A = \frac{1}{2} \sqrt{K + \frac{1}{K} + 2}. \quad (8)$$

Используя (8), в явном виде найдем выражение для КБВ. Выполнив ряд несложных преобразований, получим квадратное уравнение для  $K$ :

$$K^2 + (2 - 4A^2)K + 1 = 0.$$

Решив его, получим

$$K_{\pm} = 2A^2 \pm 2A\sqrt{A^2 - 1} - 1. \quad (9)$$

Знак «+» или «-» в решении в данном случае выбирается по физическим соображениям, а именно из условия, налагаемого на КБВ:

$$0 \leq K < 1. \quad (10)$$

С учетом (10) в (9) необходимо выбрать знак «-». Следовательно, для КБВ можем записать

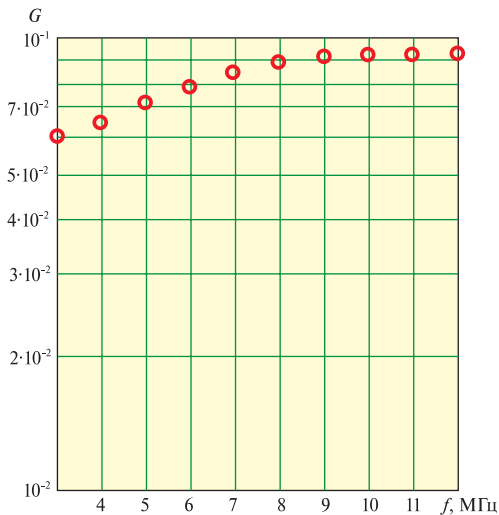


Рис. 2

$$K = 2A^2 - 2A\sqrt{A^2 - 1} - 1. \quad (11)$$

Расчеты показывают, что при КБВ от 1 до 0,5 отношение напряжений мало отличается от единицы, следовательно, точность измерения КБВ в этой области невелика. Вероятно, точность можно немного повысить, измеряя не отношения напряжений, а КБВ (например, с помощью моста полных сопротивлений) согласованного согласующего устройства, отсоединенного от фидера. Если при этом оно остается нагруженным на волновое сопротивление фидера, его входное сопротивление равно комплексно-сопряженному входному сопротивлению фидера с антенной, а КБВ равен КБВ фидера с антенной. Однако из-за незначительной разницы упомянутых напряжений настройка на максимум будет тупой, вследствие чего при высоких значениях КБВ точность измерений в любом случае окажется невелика.

**Результаты исследований.** Предложенные методики были апробированы на ряде действующих радиостанций и подтвердили свою состоятельность. В качестве примера на рис. 2 показана частотная характеристика КУ, полученная с помощью формулы (2). Из представленных данных видно, что

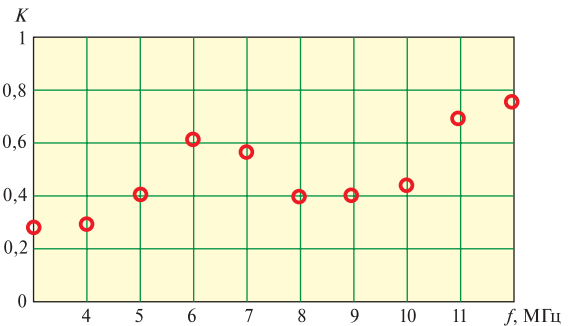


Рис. 3

значения КУ вполне соответствуют общеизвестным данным для подземных антенн [3]. На рис. 3 представлена частотная характеристика КБВ для той же подземной антенны, определенная по формуле (11). Следует заметить, что ошибка методики возрастает по мере улучшения согласования, на что было указано выше. Однако подобный характер изменения ошибки нельзя считать недостатком методики, поскольку она направлена на выявление случаев существенного ухудшения согласования.

**Таким образом, предложенные методики косвенного оценивания коэффициента усиления и коэффициента бегущей волны подземных антенн позволят обеспечить надежный контроль состояния недоступных антенн в процессе эксплуатации, повышая тем самым уровень их постоянной готовности к работе.**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Колояров И.А.** Обеспечение постоянной готовности недоступных подземных антенн ДКМВ-диапазона // Труды НИИР. — 2010. — № 4. — С. 63 — 67.
2. **Никольский В.В., Никольская Т.И.** Электродинамика и распространение радиоволн. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1989.
3. **Лавров Г.А., Князев А.С.** Приземные и подземные антенны. — М.: Сов. радио, 1965.
4. **Долуханов М.П.** Распространение радиоволн. — М.: Связь, 1972.
5. **Калинин А.И., Черенкова Е.Л.** Распространение радиоволн и работа радиолиний. — М.: Связь, 1971.

Получено 16.03.11

## ИНФОРМАЦИЯ

### ТЕХНОЛОГИИ PLUG&PLAY В РОССИИ

**В апреле московский провайдер ОнЛайм представил инновационное устройство для доступа к цифровому ТВ, равных которому пока в России нет.**

OnLime TeleCARD — полноценное plug&play решение для самостоятельного подключения цифрового ТВ высокой четкости HDTV (Full HD), не требующее вызова специалиста и прокладки дополнительных проводов.

В комплект OnLime TeleCARD входит смарт-карта и CAM-модуль — устройство для ее установки. Для использования супертехнологичной новинки достаточно установить OnLime TeleCARD в слот CI или CI+ и настроить его с помощью простой пошаговой инструкции, прилагающейся к карте. Адрес подключения должен входить в зону охвата сети ОнЛайм. Телевизор оснащен DVB-C тюнером.

Благодаря новому продукту абоненты ОнЛайм смогут максимально быстро и удобно подключать цифровое ТВ, а также пользоваться рядом полезных функций. Это — поддержка HD и 3D, управление с ТВ-пульта, а также дополнительные сервисы: поддержка вещания на иностранных языках, электронная программа передач и т.д.

ОнЛайм предлагает своим абонентам один из лучших базовых пакетов цифрового ТВ, в который помимо 88 цифровых каналов входят и два HD-канала. В апреле компания запустила HD-пакет. В него вошли семь телеканалов, такие как Discovery Showcase, Animal Planet, MTVN, Fashion One и др.

