

Согласование малоразмерных штыревых антенн с помощью конверторов импеданса

Ключевые слова: антенна, согласование, конвертор отрицательного импеданса

Все более возрастающие требования к миниатюризации радиоаппаратуры приводят к уменьшению габаритных размеров антенн. Как определено в работах [1, 2] размеры антенны и добротность ее импеданса, определяющая мгновенную рабочую полосу антенны, связаны известным соотношением:

$$Q = \frac{1 + 3(kr)^3}{(kr)^3(1 + (kr)^2)},$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, соответствующая центральной частоте рабочего диапазона, r – радиус сферы, заключающей антенну.

Для обеспечения широкой рабочей полосы приходится понижать добротность за счет потерь, уменьшая КПД антенны, что в свою очередь приводит к снижению коэффициента усиления антенны и параметров всего радиотракта. Например, штыревая антенна, показанная на рис.1 имеет длину 1,4 м, диаметр 40 мм и при этом должна обеспечивать мгновенную рабочую полосу частот 1,5-30 МГц. Согласование этой антенны LCR цепями приводит к уменьшению результирующего коэффициента усиления антенны в нижней части диапазона 1,5-10 МГц, где $kl \ll 1$, до значений существенно меньших единицы.



Рисунок 1. КВ штыревая антенна системы радиомониторинга

Эффект малой длины антенны рис.1 наглядно можно проследить на шумовой дорожке спектроанализатора рис.2, включенного на выходе этой антенны. Как видно из рис.2,

эффективность приема на нижнечастотном конце рабочего диапазона до частот порядка 10МГц существенно ниже и сигналы практически подавлены в шумах.

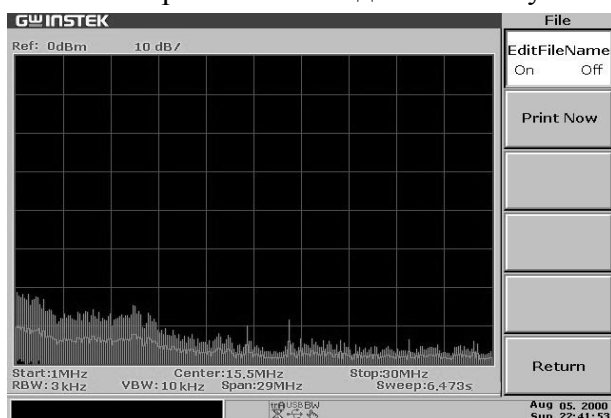


Рисунок 2. Спектрограмма принятого антенной рис.1 сигнала на выходе приемника

С подобными проблемами приходится сталкиваться и разработчикам антенн мобильных телефонов, в которых возрастающее число функциональных возможностей приводит к практически полному исчезновению свободного пространства в корпусе телефона для размещения качественной антенны. В литературе последних лет широко обсуждается возможность использования для согласования малоразмерных антенн активных цепей, в частности конверторов отрицательного сопротивления (КОИ).

Графические зависимости мнимой (помечены треугольниками) и вещественной (квадраты) составляющих входного импеданса антенны рис.1 приведены на рис.3. Здесь экспериментальные кривые показаны пунктиром, а полученные в результате моделирования - сплошными линиями.

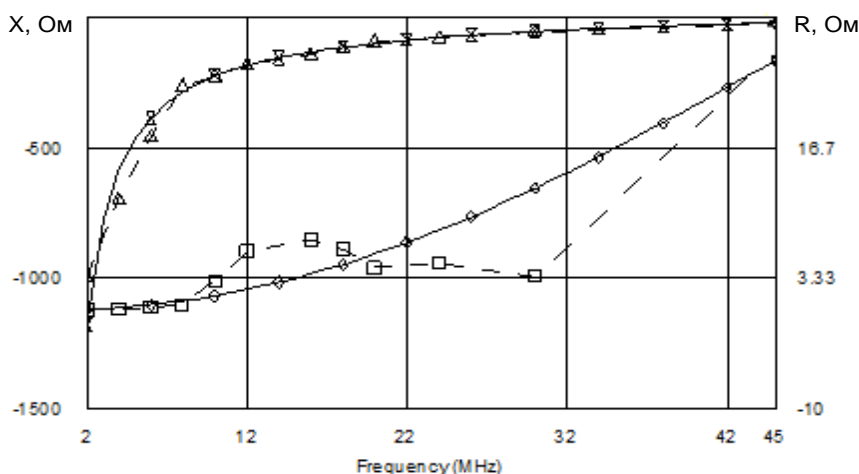


Рисунок 3. Входной импеданс штыревой антенны

Как видно из рис.3, мнимая составляющая входного импеданса имеет емкостной характер и в рабочем диапазоне частот более чем на порядок превышает вещественную составляющую.

На рис.4а показана эквивалентная схема входного импеданса этой антенны, справедливая в диапазоне частот 1-45 МГц. В нижней части рабочего диапазона частот

входной импеданс антенны может быть аппроксимирован с достаточной для предварительных расчетов точностью упрощенной схемой, приведенной на рис.4б.

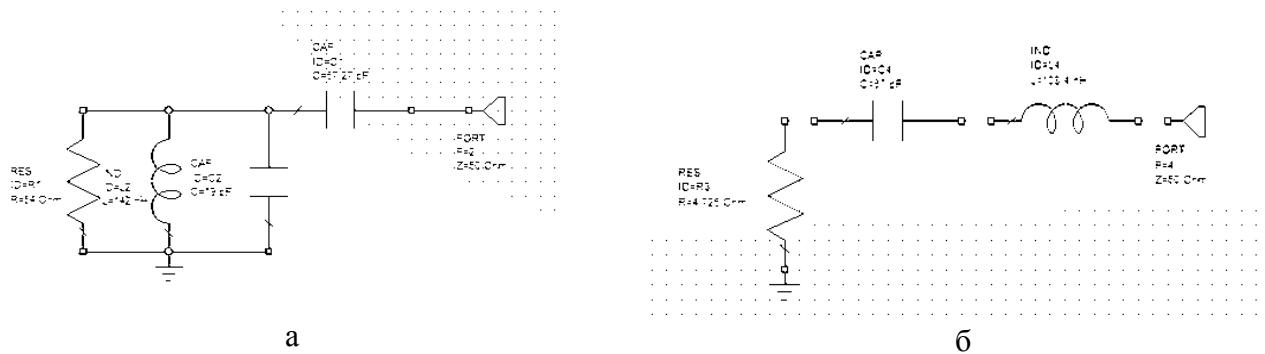
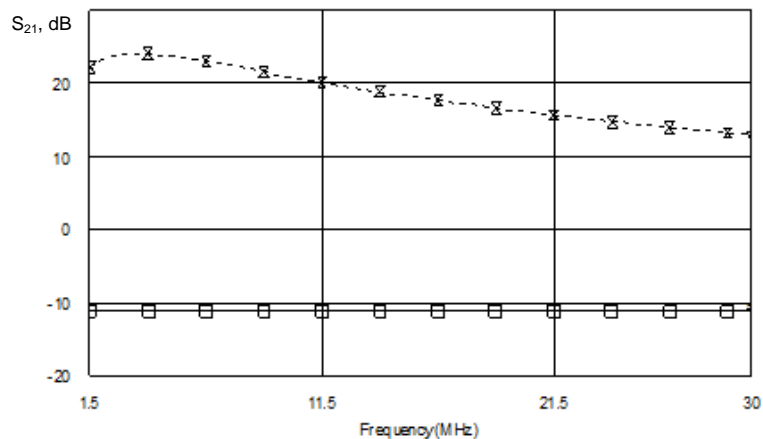
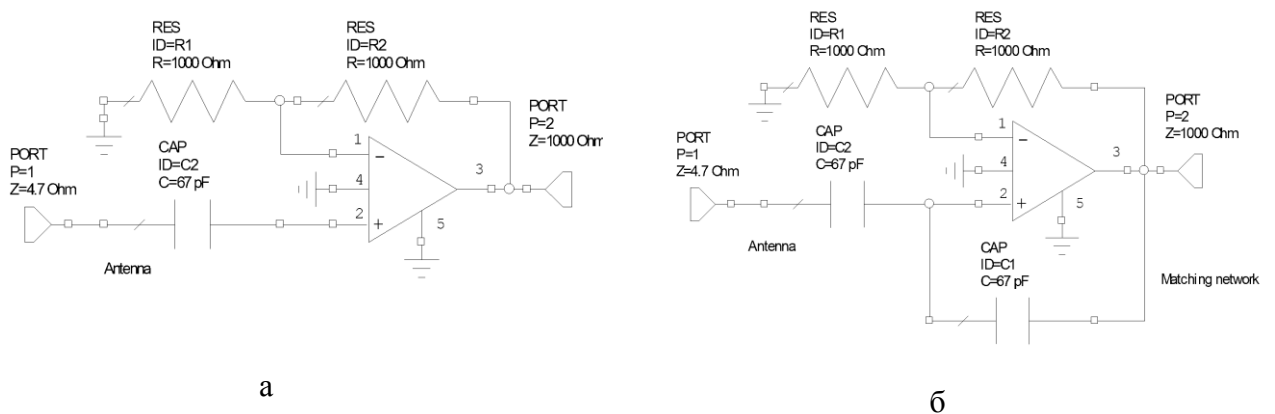


Рисунок 4. Аппроксимация входного импеданса антенны

Таким образом (см. рис.4б), в диапазоне 1,5-10 МГц эквивалентная схема входного импеданса представляется последовательным соединением резистора и конденсатора, а ее добротность в указанном диапазоне $Q \geq 40$, что делает невозможным построение классической согласующей цепи [3].



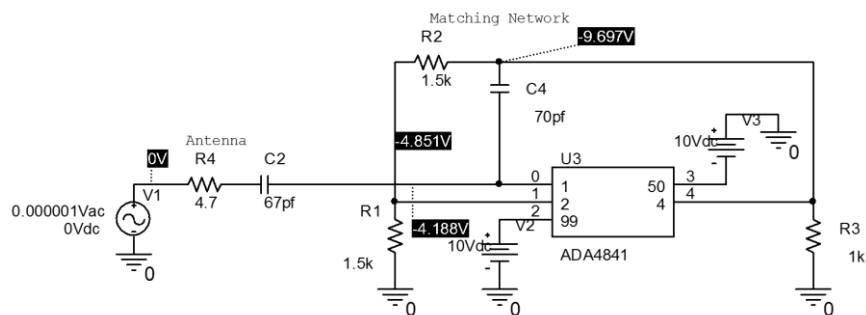
В

Рисунок 5. Схема входного каскада без компенсации емкости антенны (а), с компенсацией с помощью КОИ (б) и их характеристики передачи (в)

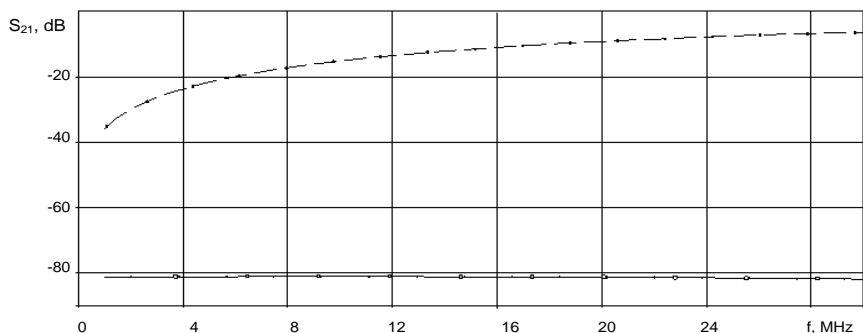
Согласование антенны в длинноволновой части рабочего диапазона возможно с помощью конверторов отрицательного сопротивления (КОИ) [4, 5], которые реализовали бы последовательно включенный с антенной конденсатор с отрицательной емкостью $C=67\text{нФ}$ и при дальнейшей трансформации вещественной составляющей импеданса до приемлемой величины могли бы обеспечить эффективную работу аппаратуры во всей полосе частот. Такую схему возможно осуществить с помощью высокочастотного малошумящего операционного усилителя (МОУ). Модель антенны с МОУ с коэффициентом передачи $K=2$ показана на рис.5а. На рис.5б показана схема с МОУ, на основе которого реализован КОИ, формирующий отрицательную емкость на входе антенны.

Частотные зависимости коэффициентов передачи для обоих случаев приведены на рис.5в, где сплошная линия соответствует схеме рис.5а, а пунктирная – схеме рис.5б. Как видно из приведенного графика использование МОУ, реализующего схему конвертора отрицательной емкости, позволяет существенно повысить эффективность приема сигналов на штывевую малоразмерную антенну.

Для практической реализации согласующей цепи на основе КОИ был выбран усилитель ADA4841. Чтобы обеспечить устойчивость работы МОУ в широкой полосе частот, полной компенсации емкости эквивалентной антенне конденсатора $C=67\text{нФ}$ отрицательной емкостью не производилось, параметры КОИ были подобраны так, чтобы величина результирующей емкости в цепи антенны была большой, положительной и составляла примерно 1500пф. Схема согласующей цепи показана на рис.6а, а характеристики передачи с компенсацией емкости и без нее на рис.6б.



а



б

Рисунок 6. Схема и характеристики передачи согласующей цепи с КОИ на реальном МОУ

Здесь, как и на рис.5, сплошная линия соответствует коэффициенту передачи от эквивалентного антенне источника сигнала без компенсации ее емкости, а пунктирная – схеме рис.6а с реализацией КОИ.

Одним из недостатков цепей согласования на активных приборах являются увеличение коэффициента шума приемника. Однако в диапазоне коротких волн основными шумами для приемника являются внешние шумы из эфира и можно ожидать, что шумы КОИ существенного влияния на работу тракта не окажут.

Другим недостатком таких цепей является возможность появления интермодуляционных сигналов. Уровень интермодуляционных сигналов прогнозировать в цепях согласования с КОИ значительно труднее, т.к. заранее неизвестны как значения частот сигналов, присутствующих каждый из моментов времени в эфире, так и их уровень. Этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании. Поэтому при оптимизации согласующей цепи на основе КОИ особое внимание было обращено на минимизацию уровня вносимых шумов со стороны КОИ.

В докладе приводятся результаты разработки согласующей цепи на основе КОИ и результаты экспериментальных исследований штыревой антенны.

Библиографический список

1. Volakis J., Chen C-C., Fujimoto K. Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications - McGraw-Hill Companies, N.Y., 2012, 428pp.
2. D.H.Kwon "On the Radiation Q and Gain of Crossed Electric and Magnetic Dipole Moment", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.53, pp.1681-1687, May 2005.
3. Фано Р.М. Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов: Пер. с англ./Под ред. Г.И.Слободенюка.-М.:Сов.Радио, 1965. -65с.
4. S.E.Sussman-Fort, R.V.Rudish, "Non-Foster Impedance Matching of Electrically-Small Antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.57, pp.2230-2241, 2009.
5. J.T.Aberle, "Two-Port Representation of an Antenna with Application to Non-Foster Matching Network", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.56, pp.1218-1222, May 2008.