

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОСОЗАПИРАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ В СТРУКТУРЕ ПРОВОДНОЙ АНТЕННЫ V-ТИПА

А. В. Демаков, Т. Т. Газизов

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40  
E-mail: vandervals@inbox.ru*

Рассматривается метод модернизации действующей антенны V-типа с помощью полосозапирающих фильтров. Исследуется работа генетических алгоритмов по оптимизации параметров фильтров по критерию минимизации КСВН на заданных частотах. Представлены результаты моделирования исходной и оптимизированной конструкций антенны и проведен их анализ.

Обеспечение качественной связи на дальние расстояния является актуальной задачей и имеет важное стратегическое значение [1]. Системы связи КВ-диапазона постоянно модернизируются с целью уменьшения их габаритных размеров [2], улучшения технических характеристик и обеспечения устойчивости сеансов связи в сложной электромагнитной обстановке [3]. Одним из направлений модернизации является применение полосозапирающих фильтров (ПЗФ) в структуре антенны для улучшения её характеристик [4]. В данной работе рассматривается модернизация действующей антенны V-типа с целью улучшения её характеристик на рабочих частотах с помощью ПЗФ.

ПЗФ представляет собой резонансную структуру, пропускающую колебания вне пределов определенной полосы частот. Включение ПЗФ в структуру проводной антенны позволит добиться требуемой электрической длины антенны на требуемых частотах, тем самым обеспечив согласование с питающей линией передачи.

Рассматриваемая структура типа Inverted-V обладает следующими размерами: длина лучей – 16 м, угол между лучами –  $65^\circ$  (рис. 1). Перед выполнением оптимизации был проведен анализ частотной зависимости коэффициента стоячих волн по напряжению (КСВН) исходной конструкции в программах CST MWS и TALGAT [5] (рис. 2).

Как видно из полученных зависимостей, исходная структура антенны согласована с питающей линией передачи на частотах вблизи 4,6 МГц, тогда как во всем остальном рассматриваемом частотном диапазоне КСВН  $\gg 2$  (рис. 2). Поэтому в качестве целевой функции оптимизации был выбран минимум КСВН на заданной частоте.

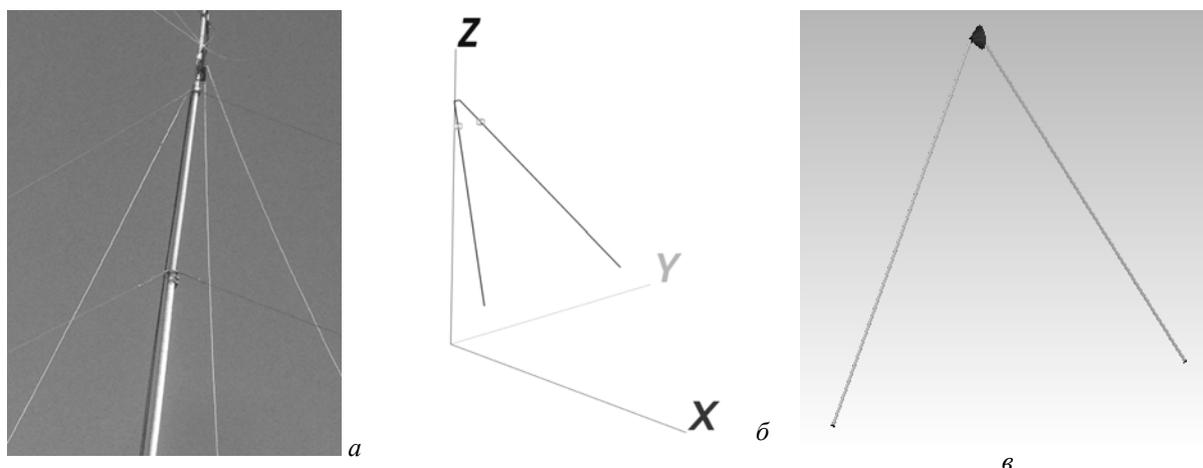


Рис. 1. Общий вид исследуемой антенны типа Inverted-V (а) и её модели в программах TALGAT (б) и CST MWS (в)

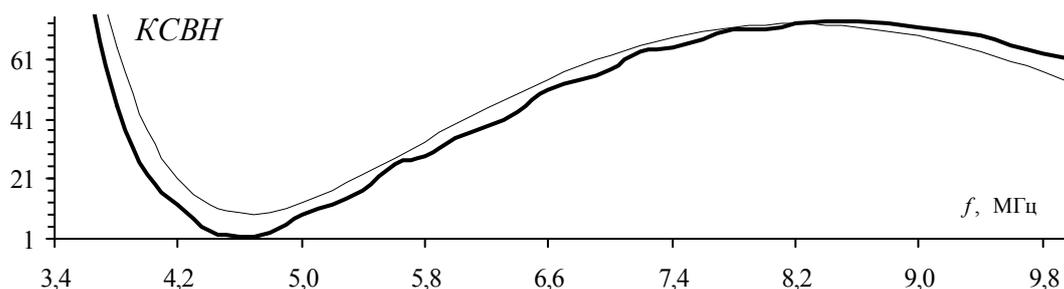


Рис. 2. Частотные зависимости КСВН исходной структуры, вычисленные в программах TALGAT (–) и CST MWS (—)

Выбор номиналов ПЗФ и мест их включения в структуру антенны был выполнен в программе TALGAT с помощью генетических алгоритмов (ГА) [5]. На первом этапе оптимизации выполнено включение двух ПЗФ в структуру антенны, расположенных симметрично в каждом луче антенны на расстоянии от точки подключения питания  $Len$ . Выполнена оптимизация емкости  $C$  ПЗФ и расстояния  $Len$  при  $R = 820$  Ом и  $L = 3,9$  мкФ (табл. 1). В качестве целевой функции был выбран минимум КСВН на частоте  $f = 6$  МГц.

Таблица 1

Результаты оптимизации двух ПЗФ в структуре антенны

| Номер запуска ГА | 5 особей, 10 поколений   | 5 особей, 20 поколений  | 5 особей, 50 поколений   |
|------------------|--|---|--|
| 1                | $C = 3,28 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 0,91$ м<br>КСВН = 2,94   | $C = 3,17 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 1,05$ м<br>КСВН = 2,34  | $C = 2,75 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 3,59$ м<br>КСВН = 1,11   |
| 2                | $C = 4,22 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 6,10$ м<br>КСВН = 10,89  | $C = 1,66 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 12,05$ м<br>КСВН = 3,02 | $C = 2,197 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 8,237$ м<br>КСВН = 1,11 |
| 3                | $C = 2,5 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 4,68$ м<br>КСВН = 1,52    | $C = 2,634 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 4,87$ м<br>КСВН = 1,13 | $C = 2,23 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 8,062$ м<br>КСВН = 1,085 |
| 4                | $C = 1,78 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 10,56$ м<br>КСВН = 2,033 | $C = 2,35 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 9,02$ м<br>КСВН = 2,10  | $C = 2,718 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 4,28$ м<br>КСВН = 1,13  |
| 5                | $C = 2,85 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 4,13$ м<br>КСВН = 1,39   | $C = 3,93 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 3,87$ м<br>КСВН = 6,73  | $C = 2,825 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len = 2,08$ м<br>КСВН = 1,02  |

Наилучший вариант оптимизации данной структуры соответствует  $C = 28,25$  нФ и  $Len = 2,08$  м, а КСВН = 1,02. Частотная зависимость КСВН оптимизированной структуры антенны, а также её сравнение с КСВН исходной структуры представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

На втором этапе выполнена оптимизация четырех ПЗФ, расположенных попарно по два ПЗФ в каждом луче антенны (табл. 2). В качестве параметров оптимизации были выбраны расстояния от точки подключения питания до точки включения ПЗФ  $Len_1$  и  $Len_2$ , емкости  $C_1$  и  $C_2$ , а также индуктивность двух фильтров  $L_2$  при  $R = 820$  Ом и  $L_1 = 3,9$  мкФ. Целевой функцией оптимизации выбран минимум суммы КСВН на частотах 3 и 7,5 МГц.

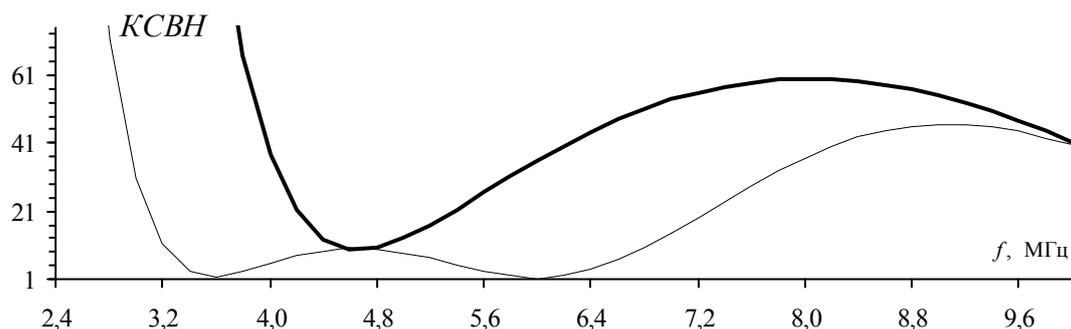


Рис. 3. Частотные зависимости КСВН оптимизированной (—) и исходной (---) структуры антенны с двумя ПЗФ

Таблица 2

Результаты оптимизации четырех ПЗФ в структуре антенны

| Номер запуска ГА | 5 особей, 20 поколений  | 5 особей, 50 поколений  |
|------------------|---|---|
| 1                | $C_1 = 1,04 \cdot 10^{-10}$ Ф, $C_2 = 3,63 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len_1 = 9,99$ м, $Len_2 = 2,73$ м<br>$L_1 = 5,754 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 2,79 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 2,78 на $f = 7,5$ МГц  | $C_1 = 4,99 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_2 = 9,956 \cdot 10^{-11}$ Ф<br>$Len_1 = 14,1$ м, $Len_2 = 3,06$ м<br>$L_1 = 9,82 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 2,67 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 3,69 на $f = 7,5$ МГц   |
| 2                | $C_1 = 6,468 \cdot 10^{-10}$ Ф, $C_2 = 1 \cdot 10^{-9}$ Ф<br>$Len_1 = 1,5$ м, $Len_2 = 7,01$ м<br>$L_1 = 4,54 \cdot 10^{-7}$ Гн<br>КСВН = 5,98 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 2,26 на $f = 7,5$ МГц       | $C_1 = 3,57 \cdot 10^{-10}$ Ф, $C_2 = 9,14 \cdot 10^{-11}$ Ф<br>$Len_1 = 4,43$ м, $Len_2 = 4,06$ м<br>$L_1 = 8,79 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 1,31 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 1,97 на $f = 7,5$ МГц   |
| 3                | $C_1 = 4,19 \cdot 10^{-10}$ Ф, $C_2 = 9,46 \cdot 10^{-11}$ Ф<br>$Len_1 = 8,76$ м, $Len_2 = 4,11$ м<br>$L_1 = 9,84 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 1,77 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 2,15 на $f = 7,5$ МГц   | $C_1 = 1,763 \cdot 10^{-10}$ Ф, $C_2 = 3,214 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len_1 = 4,54$ м, $Len_2 = 7,01$ м<br>$L_1 = 6,53 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 2,82 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 2,57 на $f = 7,5$ МГц |
| 4                | $C_1 = 8,875 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_2 = 8,96 \cdot 10^{-11}$ Ф<br>$Len_1 = 5,37$ м, $Len_2 = 1,91$ м<br>$L_1 = 9,18 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 3,27 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 4,03 на $f = 7,5$ МГц   | $C_1 = 8,634 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_2 = 1,12 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len_1 = 0,72$ м, $Len_2 = 1,98$ м<br>$L_1 = 7,13 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 8,24 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 4,45 на $f = 7,5$ МГц   |
| 5                | $C_1 = 8,079 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_2 = 1,18 \cdot 10^{-10}$ Ф<br>$Len_1 = 0,218$ м, $Len_2 = 3,98$ м<br>$L_1 = 9,078 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 3,95 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 4,99 на $f = 7,5$ МГц | $C_1 = 3,211 \cdot 10^{-10}$ Ф, $C_2 = 9,269 \cdot 10^{-11}$ Ф<br>$Len_1 = 7,9$ м, $Len_2 = 2,86$ м<br>$L_1 = 9,89 \cdot 10^{-6}$ Гн<br>КСВН = 1,54 на $f = 3$ МГц<br>КСВН = 2,13 на $f = 7,5$ МГц  |

Анализ полученных результатов показал, что наилучший вариант оптимизации соответствует  $C_1 = 35,7$  нФ,  $C_2 = 0,915$  пФ,  $Len_1 = 4,43$  м,  $Len_2 = 4,06$  м,  $L_1 = 8,79$  мкГн. При данных номиналах ПЗФ КСВН = 1,31 на частоте  $f = 3$  МГц и 1,97 на частоте  $f = 7,5$  МГц. Частотная зависимость КСВН представлена на рис. 4.

Таким образом, в данной работе показано успешное применение ГА для задач поиска экстремума целевых функций на примере КСВН рассмотренной антенны. Вычислительный эксперимент показал, что включение двух и четырех ПЗФ позволяет уменьшить КСВН на заданных частотах до приемлимого значения (рис. 3, 4). В дальнейшем планируется апробировать реализацию лучшей полученной структуры на практике и оценить её характеристики.

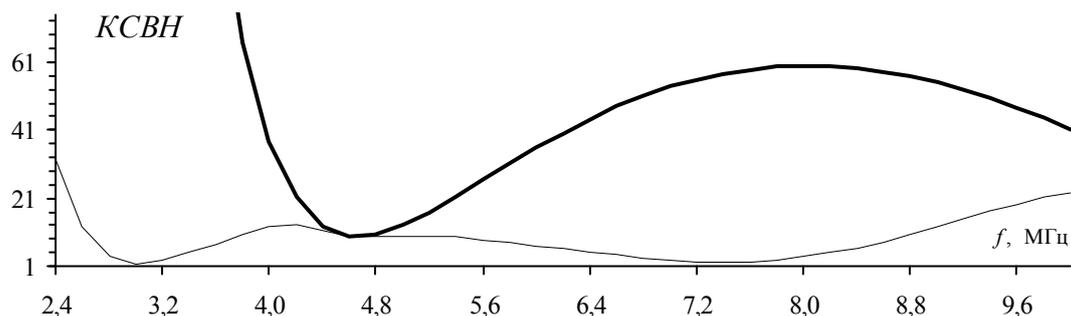


Рис. 4. Частотные зависимости КСВН оптимизированной (—) и исходной (—) структуры антенны с четырьмя ПЗФ

#### Список литературы

1. Wide-Band High-Frequency Antennas for Military Vehicles: Design and testing low-profile half-loop, inverted-L, and umbrella NVIS antennas / M. Ignatenko, S. Sanghai, G. Lasser, B. Allen, R. Smith, M. Notaros, D.S. Filipovic // IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016. Vol. 58. Is. 6. P. 64–74.
2. Белянский В.Б., Прошин А.Б., Худяков К.Н. Антенны ДВ, СВ и КВ диапазонов цифрового звукового вещания уменьшенных габаритов // Т-КОММ - Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 8. С. 28–29.
3. Лях Б.А., Кондратенко В.А. Моделирование системы радиомониторинга сигналов адаптивных систем радиосвязи коротковолнового диапазона // Системный анализ и прикладная информатика. 2015. № 2. С. 50–53.
4. Газизов Т.Т. Синтез оптимальных проводных антенн. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2013. 120 с.
5. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2015. № 2(36). С. 45–50.
6. Иванов И.А., Сопов Е.А. Исследование эффективности стандартного генетического алгоритма // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. № 7. С. 319–320.