

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиophysический институт (НИРФИ)

Препринт № 198

КОМПЛЕКСНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ОБЪЕДИНЕННЫХ КАЧЕСТВ
ПОЛНОПОВОРОТНЫХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕН (РЕФЛЕКТОРОВ) РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	3
I. Определение взаимосвязи основных характеристик антенн методом анализа размерностей	4
2. Размерные критерии и комплекс оптимальных параметров	7
3. Коэффициент совершенства конструкции (КСК) - безразмерный критерий оценки качеств полноповоротных антенн	15
Заключение	20
Литература	23

Введение

Обобщенные или комплексные критерии для оценки и прогнозирования параметров полноповоротных зеркальных антенн являются одной из проблем современного антенностроения.

Для антенн радиотелескопов, даже для основных характеристик: рабочего диапазона длин волн, диаметра и веса, не выявлены с нужной достоверностью и точностью объединяющие их закономерности и связи. На необходимость и важность выявления подобных связей указывается в [1, 6]. В данной работе была поставлена цель выяснить, по возможности, хотя бы самые общие закономерности, объединяющие указанные характеристики.

Для выполнения поставленной задачи необходимо было предварительно уточнить основные конструктивные признаки антенны и конкретизировать смысл и содержание их характеристик.

К основным конструктивным признакам были отнесены:

- 1) геометрическая форма элементов, преобладавших в конструкции (стержни),
- 2) вид механических связей между элементами (статические),
- 3) конструктивные характеристики использованного материала (удельный вес, удельная прочность, удельная жесткость и т.д.).

Для такой модели антенны искомые связи характеристик определялись механическими закономерностями и, в частности, общим для всех металлов законом Гука.

Подобное представление об объекте анализа на входе исключало антенны с элементами другой формы и более сложными видами связей. Следовательно, из анализа исключались антенны с искусственно упорядоченными деформациями (гомологические) или, по нашей терминологии, конструкции с кинематическими связями элементов. Для еще большего упрощения задачи были исключены антенны, защищенные колпаками и с различными видами ограничений обзора. Эти ограничения ставили все рассматриваемые антенны в приблизительно равные условия в части воздействия

внешних и весовых нагрузок.

В дальнейшем для краткости антенны, соответствующие принятому нами описанию, будем условно называть обычными, а исключенные из рассмотрения — специальными. После уточнения описания объекта возникла необходимость конкретизации и самих антенных характеристик.

Понятие общий вес антенны включало вес всех её элементов, объединенных в единую поворачивающуюся по углу места конструкцию. Все элементы такой конструкции рассматривались равнозначными независимо от степени их активности в создании и сохранении общих функциональных качеств антенны. Для оценки функциональных качеств был использован привычный антенный параметр — относительный диаметр [4]. Но при этом за характеристику точности была принята полусумма среднеквадратичных отклонений геометрии поверхности в крайних положениях антенны по углу места ("Зенит", "Горизонт"). Такое представление о точности и весе антенны существенно упрощало анализ изменений качеств конструкции, связанных с её поворотом по углу места.

Выбор характеристик, описание антенны, как объекта анализа, поиск метода решения, т.е. все приведенные выше ограничения, были ориентированы на соблюдение общих принципов теории прогнозирования и принятия решений [7]. Классификация, структурное представление о связях и свойствах и, наконец, состояние антенных конструкций рассматривались с самых общих позиций системного проектирования [3].

I. Определение взаимосвязи основных характеристик антенн методом анализа размерностей

В целом задача о взаимосвязи основных характеристик сводилась к выявлению физических возможностей внешней и внутренней структуры антенн определенного класса.

В системном проектировании такие задачи связаны с поиском критериев оптимальности самого низкого (физического) уровня. В этом суть и новизна данной работы.

Общая постановка задачи позволила использовать для её решения методику анализа размерностей [2, 6]. Суть метода анализа размерностей в следующем: предварительно выписывается таблица величин, от которых предположительно зависит ответ, далее составляются формулы размерностей этих величин и, наконец, налагаются следующие условия: эти величины должны входить в функциональные связи, не зависящие от единиц,

в которых они измерены.

За основное условие взаимосвязи было принято общетехническое положение: все свойства конструкций заложены в материале, а конструктивные формы — только средство для выявления этих свойств [8].

Ограничивая возможные конструктивные формы некоторым образом для всех конструкций объемом (D^3), получаем для анализа вполне определенную физическую модель антенны любого размера (Куб с определенной концентрацией массы материалов). Указанная модель хорошо согласуется с требованием равных размеров в любом направлении, выдвинутом Хорнером для полноповоротных антенн [9].

Принятое основное условие требует дополнить исходные признаки, описывающие модель (D ; ϵ ; G), ещё одним, характеризующим физическую природу связей или иначе общие качества использованного в антенне материала. За такую характеристику принимаем удельный вес материала (d).

Следовательно исходная таблица будет представлена следующими величинами:

- 1) G — [F] — вес антенны,
- 2) D — [L] — диаметр антенны,
- 3) ϵ — [L] — интегральная (средняя) погрешность поверхности,
- 4) d — [$F \cdot L^{-3}$] — удельный вес использованного в конструкции материала,

где [F] — размерность силы, [L] — размерность длины.

Мы должны выразить G как функцию D ; ϵ ; d таким образом, чтобы функциональное соотношение характеристик осталось бы неизменным в любой системе размерных единиц. Поскольку вес является наиболее сложной характеристикой и практически входит в описание самых различных качеств и свойств конструкций (физических, конструктивных, технологических, экономических и т.д.), то выбираем показателем для него единицу и составляем безразмерное произведение в форме

$$G \cdot d^{\alpha} \cdot D^{\beta} \cdot \epsilon^{\delta} = \text{const.} \quad (1)$$

Размерность множителей в итоге должна быть такая же, как у веса, который в дальнейшем будет стоять отдельно в левой части:

$$F \cdot [F \cdot L^{-3}]^{\alpha} \cdot L^{\beta} \cdot \epsilon^{\delta} = 1. \quad (2)$$

Выписываем последовательно условия равенства с обеих сторон уравнения:

$$F: 1 + \alpha = 0; \quad L: -3\alpha + \beta + \gamma = 0.$$

Полагая γ - произвольным показателем, уравнение (1) примет вид

$$\text{const} = G d^{-1} D^{-3-\gamma} \varepsilon^{\gamma} \quad (3)$$

Значение константы и веса ничем не ограничены, поэтому все члены могут быть слиты в единую произвольную функцию, и результат можно записать

$$G = \text{const} d \varphi \left(\frac{D}{\varepsilon} \right) D^3 = \text{const} d \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)^{\gamma} D^3, \quad (4)$$

где φ - неопределенная функция.

Однако в таком неопределённом виде решение нас не может удовлетворить. Но это соотношение хорошо согласуется со статистическими зависимостями типа

$$G = m D^3, \quad (5)$$

где m - статистический коэффициент, в большинстве случаев величина постоянная или близкая к ней для всего интервала размеров (рис. 2).

Недостатки статистических методик и преимущества анализа размерностей были детально рассмотрены в одной из работ НИРФИ [6].

При $\gamma = 1$ статистический коэффициент m в соотношении (4) имеет вид функции

$$m = \text{const} d \frac{D}{\varepsilon} = A N = \frac{N}{m}, \quad (6)$$

где все аргументы приобретают конкретный смысл обобщенных и взаимосвязанных характеристик:

$m = G / D^3$ - условный объёмный вес (плотность), определяемый пространственным распределением материала в объёме конструкции,

$N = D / \varepsilon$ - относительный размер или относительный диаметр, принятый в антенностроении показатель общих радиотехнических качеств (основной функциональный параметр),

$A = m / N$ - удельный объёмный вес (удельная плотность),

$M = 1/A = N/m$ - коэффициент использования объёмного веса (КИОВ).

Окончательное решение задачи о взаимосвязях исходных характеристик приняло вид

$$M = \frac{N}{\pi} = \frac{D^3 N}{\varepsilon} = \frac{D^4}{G \varepsilon}. \quad (7)$$

Подобное соотношение относительного размера и условного объемного веса возможно получить и более простым способом на основе π -теоремы того же анализа размерностей.

Согласно π -теоремы решение исходного уравнения

$$f_0(G; D; \varepsilon; d) = 0$$

имеет вид

$$f(\pi_1, \pi_2) = 0,$$

где π_1 и π_2 - независимые произведения исходных параметров, которые не имеют размерности относительно основных единиц (силы, длины). π -теорема устанавливает связь между исходной функцией, выраженной через четыре размерных переменных, в виде двух величин в безразмерной форме. При этом выполняется необходимое условие теоремы: число безразмерных комплексов (независимые произведения) равно числу всех размерных величин, существенных для рассматриваемого объекта, за вычетом числа первичных величин (размерность силы и длины). В этом случае нетрудно представить первый комплекс в виде известного функционального параметра (относительного размера), но в части второго комплекса требуются уже некоторые усилия. Необходима определенная предпосылка, ориентирующая на взаимосвязь условного объемного веса и материала антенны. В данном решении за второй комплекс принималась искусственная величина "приведенная плотность", - отношение условного объемного веса к удельному весу использованного в антенне материала. Подробное решение на основе π -теоремы приведено в [6].

По существу анализ размерностей представил через исходные характеристики совокупные свойства антенн в виде одного размерного показателя КИОВ.

2. Размерные критерии и комплекс оптимальных параметров

Полученный размерный показатель КИОВ требовал количественного подтверждения по данным параметров реальных конструкций. В этом смысле, применяя КИОВ как основу, позволяющую избежать субъективных суждений совокупных качеств антенны, мы используем его как основной критерий

оптимизации исходных характеристик.

Из выражения (7) видно, что противоречивым стремлениям равнозначных частных характеристик ($D \rightarrow \max$, $\varepsilon \rightarrow \min$, $G \rightarrow \min$) удовлетворяет максимальная величина критерия $M_{\max} = M_0$.

Поиск наилучших значений частных характеристик и предельная величина самого критерия M_0 проводился различными методами инженерной оптимизации:

- статистическими,
- методом базовых точек,
- по принципам равенства и максимина теории принятия решений,
- аналогиями с конструктивными характеристиками материалов и т.д.

В результате было получено предельное (для обычных антенн) значение $M_0 = 1,25 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{кг}$ и наилучшая (средняя) величина оптимального веса $G_0 = 160 \text{ т}$. [6]. Эти размерные критерии позволили выразить оптимальные (по критерию M_0) соотношения геометрических характеристик:

$$\frac{D_0^4}{\varepsilon_0} = G_0 M_0 = V_0 = \text{const}, \quad (8)$$

где $V_0 = 2 \cdot 10^9 = 10^{9.3} \text{ (м}^3\text{)}$ - постоянная с размерностью объема, которая была названа условным функциональным объемом.

С точки зрения системного проектирования [3] исходные характеристики представляли соответствующие структуры антенны:

G_0 - внутреннюю (вес и приведенные к весу нагрузки),

$D_0; \varepsilon_0$ - внешнюю макро- и микро структуру.

Принятые в модели обычной антенны статические связи элементов исключали все свойства и взаимодействия, изменяющиеся во времени. Размерный критерий M_0 выделял только основу антенных конструкций - общую физическую сущность единства внутренней и внешней структуры в статическом состоянии [3].

Интересно то, что размерные критерии M_0 , V_0 , G_0 связали в модели обычной антенны известные общетехнические показатели - удельную массу и удельный объем [10]:

$$g_0 = m_0 \nu_0, \quad (9)$$

где $g_0 = G_0 / N_0 = m_0 D_0^3 / N_0 = D_0^3 / M_0$ - удельная масса, $\nu_0 = D_0^3 / N_0$ - удельный объем (металлоемкость).

В табл. 1 приведены величины оптимальных характеристик обычных конструкций в зависимости от рабочего диапазона длин волн ($\lambda_0 = 20\epsilon_0$).

Таблица 1

f	λ_0	ϵ_0 , м	D_0 , м	N	m_0 , кг/м ³	g_0 , кг
30 МГц	10 м	$5 \cdot 10^{-1}$	180	$0,35 \cdot 10^3$	0,03	450,0
300 МГц	1 м	$5 \cdot 10^{-2}$	100	$2 \cdot 10^3$	0,10	80,0
3000 МГц	1 дм	$5 \cdot 10^{-3}$	56	$1,1 \cdot 10^4$	0,90	14,5
30 ГГц	1 см	$5 \cdot 10^{-4}$	32	$6,3 \cdot 10^4$	5,10	2,5
300 ГГц	1 мм	$5 \cdot 10^{-5}$	18	$3,6 \cdot 10^5$	28,50	0,45
3000 ГГц	0,1 мм	$5 \cdot 10^{-6}$	10	$2 \cdot 10^6$	160	0,08
30 ТГц	0,01 мм	$5 \cdot 10^{-7}$	5,6	$1,1 \cdot 10^7$	900	0,02

В табл. 2 приведены оптимальные характеристики для диаметров от 7 до 200 м (при $\lambda_0 = 16\epsilon_0$).

Таблица 2

D_0 , м	ϵ_0 , мм	N_0	m_0 , кг/м ³	g_0 , кг	λ_0 , см	f_0 , МГц
1:	2	3	4	5	6	7

Децимиллиметровый диапазон

7	0,001	$56 \cdot 10^5$	466	0,027	0,002	$1562 \cdot 10^4$
8	0,002	$39 \cdot 10^5$	313	0,041	0,003	$916 \cdot 10^4$
9	0,003	$27 \cdot 10^5$	219	0,058	0,005	$572 \cdot 10^4$
10	0,005	$20 \cdot 10^5$	160	0,080	0,008	$375 \cdot 10^4$
11	0,007	$15 \cdot 10^5$	120	0,106	0,012	$256 \cdot 10^4$
12	0,010	$11,6 \cdot 10^5$	92,59	0,138	0,017	$181 \cdot 10^4$
13	0,014	$9,10 \cdot 10^5$	72,83	0,176	0,023	$131 \cdot 10^4$
14	0,019	$7,29 \cdot 10^5$	58,31	0,220	0,030	$97 \cdot 10^4$
15	0,025	$5,93 \cdot 10^5$	47,41	0,270	0,040	$74 \cdot 10^4$

I : 2 : 3 : 4 : 5 : 6 : 7

16	0,033	4,88 · 10 ⁵	39,06	0,328	0,052	57 · 10 ⁴
17	0,042	4,07 · 10 ⁵	32,57	0,393	0,067	45 · 10 ⁴
18	0,053	3,43 · 10 ⁵	27,43	0,467	0,084	36 · 10 ⁴

Миллиметровый диапазон (КВЧ)

19	0,065	2,92 · 10 ⁵	23,33	0,549	0,10	288 · 10 ³
20	0,080	2,5 · 10 ⁵	20,00	0,640	0,13	234 · 10 ³
21	0,097	2,16 · 10 ⁵	17,28	0,741	0,16	193 · 10 ³
22	0,117	1,88 · 10 ⁵	15,03	0,852	0,19	160 · 10 ³
23	0,140	1,64 · 10 ⁵	13,15	0,973	0,22	134 · 10 ³
24	0,166	1,44 · 10 ⁵	11,57	1,106	0,26	113 · 10 ³
25	0,195	1,28 · 10 ⁵	10,24	1,25	0,31	96 · 10 ³
26	0,228	1,14 · 10 ⁵	9,10	1,41	0,37	82 · 10 ³
27	0,266	1,02 · 10 ⁵	8,13	1,57	0,43	70,5 · 10 ³
28	0,307	9,1 · 10 ⁴	7,29	1,75	0,50	61 · 10 ³
29	0,354	8,2 · 10 ⁴	6,56	1,95	0,57	53 · 10 ³
30	0,405	7,4 · 10 ⁴	5,93	2,16	0,65	46 · 10 ³
31	0,462	6,7 · 10 ⁴	5,37	2,38	0,74	41 · 10 ³
32	0,524	6,1 · 10 ⁴	4,88	2,62	0,84	36 · 10 ³
33	0,593	5,6 · 10 ⁴	4,45	2,87	0,95	32 · 10 ³

Сантиметровый диапазон (СВЧ)

34	0,668	5,1 · 10 ⁴	4,07	3,14	1,07	28 · 10 ³
35	0,750	4,7 · 10 ⁴	3,73	3,43	1,2	25 · 10 ³
36	0,840	4,3 · 10 ⁴	3,43	3,73	1,3	22 · 10 ³
37	0,937	3,9 · 10 ⁴	3,16	4,05	1,5	20 · 10 ³
38	1,04	3,6 · 10 ⁴	2,92	4,39	1,7	18 · 10 ³

I :	2 :	3 :	4 :	5 :	6 :	7
39	1,16	$3,4 \cdot 10^4$	2,70	4,75	1,85	$16 \cdot 10^3$
40	1,28	$3,1 \cdot 10^4$	2,50	5,12	2,05	$15 \cdot 10^3$
41	1,41	$2,9 \cdot 10^4$	2,32	5,51	2,26	$13 \cdot 10^3$
42	1,55	$2,7 \cdot 10^4$	2,16	5,93	2,49	$12 \cdot 10^3$
43	1,71	$2,5 \cdot 10^4$	2,01	6,36	2,74	$11 \cdot 10^3$
44	1,87	$2,4 \cdot 10^4$	1,88	6,81	2,90	$10 \cdot 10^3$
45	2,05	$2,2 \cdot 10^4$	1,76	7,29	3,28	$9 \cdot 10^3$
46	2,24	$2,0 \cdot 10^4$	1,64	7,79	3,58	$8 \cdot 10^3$
47	2,44	$1,9 \cdot 10^4$	1,54	8,31	3,9	$7,7 \cdot 10^3$
48	2,65	$1,8 \cdot 10^4$	1,45	8,85	4,25	$7,1 \cdot 10^3$
49	2,88	$1,7 \cdot 10^4$	1,36	9,41	4,61	$6,5 \cdot 10^3$
50	3,16	$1,6 \cdot 10^4$	1,28	10,00	5,00	$6 \cdot 10^3$
52	3,65	$1,4 \cdot 10^4$	1,14	11,20	5,85	$6,1 \cdot 10^3$
54	4,25	$1,3 \cdot 10^4$	1,02	12,60	6,80	$4,4 \cdot 10^3$
56	4,92	$1,1 \cdot 10^4$	0,91	14,00	7,87	$3,8 \cdot 10^3$
58	5,65	$1,0 \cdot 10^4$	0,82	15,60	9,06	$3,3 \cdot 10^3$

Дециметровый диапазон (УВЧ)

60	6,5	$9,3 \cdot 10^3$	0,74	17,30	10,4	$2,8 \cdot 10^3$
62	7,4	$8,4 \cdot 10^3$	0,67	19,10	11,8	$2,5 \cdot 10^3$
64	8,4	$7,6 \cdot 10^3$	0,61	21,0	13,4	$2,2 \cdot 10^3$
66	9,5	$7,0 \cdot 10^3$	0,56	23,00	15,2	$2,0 \cdot 10^3$
68	10,7	$6,4 \cdot 10^3$	0,51	25,20	17,1	$1,8 \cdot 10^3$
70	12,0	$5,8 \cdot 10^3$	0,47	27,40	19,2	$1,6 \cdot 10^3$
72	13,4	$5,4 \cdot 10^3$	0,43	29,9	21,5	$1,4 \cdot 10^3$
74	15,0	$4,9 \cdot 10^3$	0,39	32,4	24,0	$1,25 \cdot 10^3$
76	16,7	$4,5 \cdot 10^3$	0,37	35,1	26,7	$1,1 \cdot 10^3$

I :	2 :	3 :	4 :	5 :	6 :	7
78	18,5	$4,2 \cdot 10^3$	0,34	38,0	29,6	$1,0 \cdot 10^3$
80	20,5	$3,9 \cdot 10^3$	0,31	41,0	32,8	920
82	22,6	$3,6 \cdot 10^3$	0,29	44,1	36,2	830
84	24,9	$3,4 \cdot 10^3$	0,27	47,4	39,8	753
86	27,4	$3,1 \cdot 10^3$	0,25	50,9	43,8	686
88	30,0	$2,9 \cdot 10^3$	0,23	54,5	48,0	625
90	32,8	$2,7 \cdot 10^3$	0,22	58,3	52,5	572
92	35,8	$2,6 \cdot 10^3$	0,205	62,3	57,3	523
94	39,0	$2,4 \cdot 10^3$	0,19	66,4	62,5	480
96	42,5	$2,3 \cdot 10^3$	0,18	70,8	67,9	442
98	46,1	$2,1 \cdot 10^3$	0,17	75,3	73,8	407
100	50,0	$2,0 \cdot 10^3$	0,16	80,0	80	375
105	60,8	$1,73 \cdot 10^3$	0,14	92,6	97,2	308

Метровый диапазон (ОВЧ)

110	73	$1,50 \cdot 10^3$	0,12	106,5	117,1	256
120	104	$1,16 \cdot 10^3$	0,09	138,2	165,9	181
130	143	$0,91 \cdot 10^3$	0,07	175,8	228,5	131
140	192	$0,73 \cdot 10^3$	0,06	219,5	307,3	98
150	263	$0,59 \cdot 10^3$	0,047	270,0	405,0	74
170	418	$0,41 \cdot 10^3$	0,033	393,0	668,2	45
200	800	$0,25 \cdot 10^3$	0,020	640,0	1280,0	23

На рис. I (а, б, в) показаны в логарифмическом масштабе линии основных размерных критериев обычных стержневых антенн M_0 (6), V_0 (8) и G_0 (5) и даны контуры областей, в которых располагаются соответствующие им характеристики реальных конструкций. Границы областей установлены по крайним характеристикам обычных (точки 1, 2, 5, 6, 7) и специальных (точки 3 и 4) антенн. Для представления предельных всз-

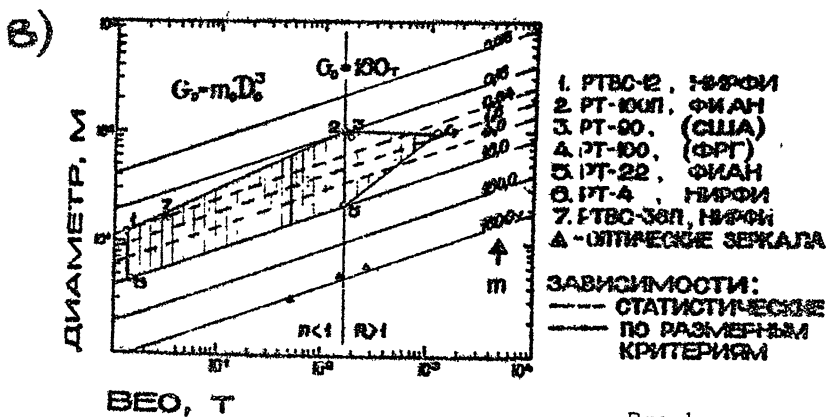
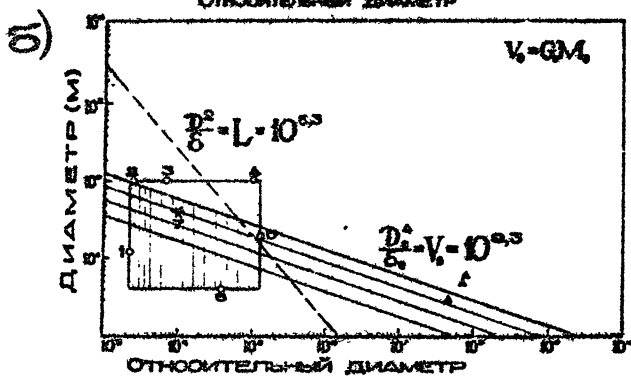
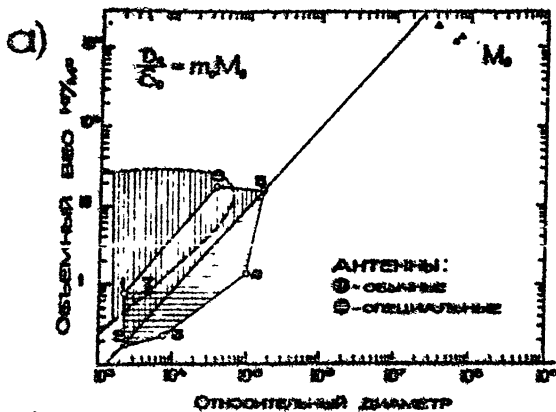


Рис. 1

возможностей стержневых конструкций в сторону повышения функциональных качеств на рис. 1 приведены соответствующие характеристики трех оптических (массивных) зеркал ($D = 3,5$ м, $D = 5$ м и $D = 6$ м)[6].

В число обычных антенн включены полноповоротные вантово-стержневые антенны (точки 1, 2, 7). На графике они характеризуют предельные возможности стержневых систем в достижении минимального веса.

Линии размерных критериев M_0 (рис. 1а) и V_0 (рис. 1б) четко разделяют обычные и специальные конструкции антенн. На графиках видно, что вантово-стержневые антенны могут создавать большие апертуры (точки 2 и 7), но по относительным размерам они уступают жестко-стержневым (точка 5) и, тем более, массивным оптическим конструкциям. В итоге подтверждается справедливость принятого исходного положения о связи свойств материала и выбранных форм элементов конструкции.

Критерий M_0 позволяет дать самую общую оценку предельных - абсолютных и относительных - размеров зеркальных антенн: $D_{max} = 1260$ м при $N_{min} = 1$ и $N_{max} = 2 \cdot 10^9$ при $D_{min} = 1$ м и $\epsilon_{min} = 0,5 \cdot 10^{-9}$ м (естественный предел точности).

На нашем укороченном (рис. 1б) графике ось ординат пересекается в точке чуть выше $D = 100$ м при $N = 10^3$.

Разделяя антенны на обычные и специальные, критерии M_0 и V_0 подтверждают, что увеличение веса более оптимально (160 т) в обычных стержневых конструкциях нецелесообразно. Линия G_0 проходит в смешанной зоне, где возможны как обычные, так и специальные антенны.

Оптимальный вес следует рассматривать как среднюю величину, характеризующую область рационального расхода массы для избранной нами упрощенной стержневой модели антенны. Для массивных оптических зеркал этот вес может оказаться и несколько больше.

Но так или иначе РТ-22 и РТ-100 БИАН и оптические зеркала (наиболее крайние по объёмному весу реальные конструкции) своими весовыми характеристиками подтверждают, что G_0 - величина не случайная. Оптимальный вес проверен и подтвержден специальными расчетами [6].

На графиках пунктиром показаны существующие в настоящее время зависимости, аналогичные критериям V_0 и G_0 .

На рис. 1б видно, что существующая зависимость L согласуется с V_0 только в зоне антенн средних размеров (точнее в одной точке).

На рис. 1в существующая статистическая зависимость показывает постоянный объёмный вес ($\sim 1,6$ кг/м³) для антенн всех размеров. В действительности при детальном и комплексном анализе реальных антенн

такое грубое усреднение не подтверждается. Как критерий оптимальный вес и условный объёмный вес значительно лучше согласуются с параметрами реальных антенн и, в частности, с крайними геометрическими характеристиками. Об этом, как было показано, свидетельствуют расположенные в зоне оптимального веса антенны 2, 3, 5 и оптические зеркала. Эти конструкции показывают объёмное распределение массы в более широкой области: от 0,016 до 16 кг/м³ - для стержневых антенн и до 1600 кг/м³ - в массивных оптических зеркалах.

3. Коэффициент совершенства конструкции (КСК) -
- безразмерный критерий оценки качества
 полноповоротных антенн

При наперёд заданном ограничении массы или диапазона удобнее использовать безразмерную форму весовой характеристики

$$G_{оп} = n G_0, \quad (I0)$$

где n - коэффициент концентрации массы (КЦМ) для антенн обычных ($n \leq 1$) и специальных ($n > 1$), $G_{оп}$ - расчетный оптимальный вес антенны при заданном n . Отсюда основные размерные критерии для меньшего расхода массы будут иметь вид $M_0 \cdot n G_0$ и $n V_0$.

При условии $D_{оп} = D_0$ оптимальные характеристики при заданном весе $G_{оп}$ или коэффициенте $n \leq 1$ будут иметь вид

$$m_{оп} = n m_0, \quad (II)$$

$$N_{оп} = n N_0, \quad (I2)$$

$$\epsilon_{оп} = \epsilon_0 / n, \quad (I3)$$

$$q_{оп} = \frac{G_{оп}}{N_{оп}} = \frac{m_{оп} D_{оп}}{N_{оп}} = \frac{D_{оп}^3}{M_0}, \quad (I4)$$

следовательно

$$q_{оп} = q_0. \quad (I5)$$

Слабая изменчивость (консервативность) удельной массы (для определенного объема) от исходных параметров - характерная особенность подобных общих инженерных оптимизационных задач [6].

В окончательном виде основное условие оптимальности исходных характеристик для i -й конструкции (обычной антенны) представлено также в безразмерной форме

$$C = \frac{A_0}{A_i} = \frac{M_i}{M_0} = \frac{g_{оп}}{g_i}, \quad (16)$$

где C - коэффициент совершенства конструкций (КСК), A_i , M_i , g_i - критерии оцениваемой конструкции или проекта для $\eta \leq 1$. Следует ещё раз обратить внимание на то, что достоверность и точность оценок проектов и реальных конструкций по размерным и безразмерным критериям целиком зависит от однозначности смысла исходных критериальных и анализируемых характеристик.

Для критериальных характеристик:

погрешность - полусумма среднеквадратичных отклонений в крайних положениях антенны;

вес - сумма масс всех элементов поворачивающихся по углу места.

В реальных конструкциях за те же характеристики обычно принимают погрешность - среднеквадратичные отклонения в положении "Зенит",

вес - сумму масс части элементов (каркас с обшивкой и конструкция угломестной оси).

Следовательно, если предварительно не уточнять и не согласовывать характеристики анализируемой антенны или проекта, мы из-за меньших значений погрешностей и веса будем получать более высокое, чем действительное, значение КМОВ.

А это в конечном счете дает излишне оптимистическую (не соответствующую действительности) оценку обобщённых качеств анализируемой антенны или проекта.

В публикациях (ретроспективная информация) в погрешностях, как правило, не учитываются их эксплуатационные изменения, а последние в зависимости от времени могут оказаться по величине не меньше первоначально опубликованных. Все это означает, что любой конкретной критериальной оценке должна предшествовать тщательная проверка данных анализируемой антенны.

При определении предельных значений критериев, как было показано выше, недостатки ретроспективной информации об антеннах заставляют ориентироваться, в описании границ зон действия размерных и безразмерных критериев, на минимальное число антенн с крайними характеристиками, из числа конструкций хорошо известных автору (рис. 1);

- использована в множестве методов инженерной оптимизации для более точного определения предельных величин.

В итоге такой подход обеспечил нужную точность величины размерных критериев и соответствующие реальной действительности границы зон их действия.

При этом, хорошо известные характеристики новых проектов и реальных антенн с минимальным объемным весом (точки 1, 2, 7 рис. 1) проверялись по расчетным данным, а характеристики антенн с наибольшим объемным весом (точки 5, 6 рис. 1) уточнялись авторами соответствующих проектов.

Характеристики двух зарубежных антенн (точки 3 и 4) рис. 1 приняты по данным последних публикаций.

Не следует считать на рис. 1в границы зон для обычных и специальных антенн какими-то абсолютными пределами, т.к. в данном случае мы имеем дело с конструктивными решениями сегодняшнего дня. В этом смысле линия (верхняя), проходящая через точки 1, 7, 2, 3 и 4, отражает достигнутый уровень технических решений антенных конструкций для жестких весовых ограничений. Соответственно линия (нижняя) точек 6, 5 и 4 представляет существующие конструктивные решения, где по разным причинам весовые ограничения были минимальны.

Такое представление о зонах действия размерных критериев подтверждается тем, что на первых графиках подобные зоны были получены по характеристикам девятнадцати обычных и десяти специальных конструкций антенн [6]. Все антенны располагались в указанных зонах.

Еще более наглядное подтверждение описанию зоны оптимальных соотношений диаметра и веса можно получить сопоставив график рис. 1 с аналогичной статистической зависимостью [11]. Видно, что линии статистической зависимости (рис. 2; на рис. 1 пунктирные линии) проходят в центре зоны оптимальных соотношений диаметра и веса, и направленность обеих соотношений совпадает. Совпадение вполне закономерно, т.к. статистическая зависимость в сущности более грубое и частное представление реального соотношения параметров существующих антенн.

Статистическая зависимость формально отражает ту же природу физических взаимосвязей характеристик, но не учитывает при этом уровня функциональных качеств ($N = \text{const}$) и конструктивных особенностей антенн ($m = \text{const}$).

Статистическая зависимость, например, не может объяснить, почему самая верхняя точка на рис. 2 (на рис. 1 точка 3) выходит за уста-

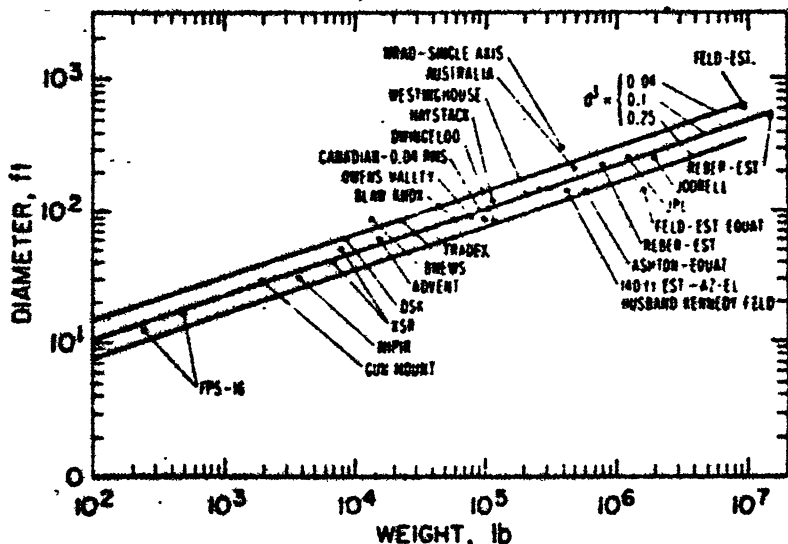


Рис. 2

В нашем представлении данная антенна конструктивно и логично выходит за рамки обычных конструкций, т.к. имеет ограниченный (до 60°) поворот по углу места, и, кроме того, она неподвижна по азимуту. Следует обратить внимание, что вес этой антенны чуть больше оптимального, что также косвенно свидетельствует в пользу нашего критерия, - оптимальный вес.

Как было показано ранее, оптимальный вес проходит в той области зоны, где в равной мере зафиксированы как обычные, так и специальные конструкции антенн. Анализ всех конструкций этой зоны выявил, что обычные антенны с весом больше оптимального имеют и удельную массу больше оптимальной. Следовательно, эффект повышения функциональных качеств за счет дальнейшего уменьшения веса более G_0 для обычных конструкций не имеет смысла.

При наперед заданных ограничениях веса и определенном размере оптимальные функциональные параметры: N_0 и объемный вес m_0 определяются в точках пересечения диаметра с соответствующей линией размерного критерия: m_0 - на рис. 1в с линией nG (слева от G_0) и N_0 на рис. 1б с линией nV_0 (ниже V_0). Любого размера оп-

тимальная антенн 1 (обычная) должна находиться на линии M_0 рис. 1а. При этом меньшее значение КИОВ (M_1 выше M_0) показывает степень несовершенства качества обычной конструкции. Перейти линию M_0 может лишь антенна, отличающаяся от обычной какими-то новыми признаками, направленными на более рациональное использование свойств материала в конструкции.

Поскольку различного рода индивидуальные оценки обобщенных качеств антенн требуют высокой достоверности и точности исходных данных о конструкциях, то работу следовало бы закончить приведенными выше общими рассуждениями. Однако большой интерес представляет количественная оценка обобщенных качеств как обычных, так и специальных конструкций. Даже при отмеченных недостатках ретроспективной информации о характеристиках можно получить довольно интересные данные, сравнив по безразмерному критерию различные конструкции антенн. Для обычных антенн КСК имеет величину от 0,07 до 0,45 [6]. В специальных конструкциях, если антенна закрыта колпаком или её поворот по углу места определен существенно выше горизонта, величина КСК больше. Но в первом случае это связано с потерями радиотехнических качеств и затратами на защитный колпак, а во втором — мы просто уменьшаем возможности обзора (на рис. 1 точка 3). Вантово-стержневые конструкции позволяют получить еще более высокие значения КСК, но такие антенны целесообразно строить для дециметровых диапазонов длин волн с размерами $D \geq 30$ м (на рис. 1 точки 1, 2 и 7) [5].

В гомологических антеннах (рис. 1 точка 4) КСК показывает наибольший эффект единства внешней и внутренней структуры антенной конструкции. Для гомологических крупных антенн ($D = 70 - 100$ м) безразмерный критерий в среднем равен $C = 5$ при $n = 7,5 - 9,35$ (на рис. 1 точка 4).

Предельные величины обобщенных критериев в обычных антеннах не изменятся до тех пор пока не появятся материалы с более высокими конструктивными качествами или более совершенные методики расчета. При переходе существующих отдельных и трудоемких расчетов внешних и внутренних структур антенн на комплексный и непрерывный машинный счет в диалоговой форме роль таких обобщенных критериев будет возрастать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбранный минимум исходных характеристик (D, ε, G) охватил совокупность геометрических (D, ε) и физических (G) качеств рефлекторных антенн.

Между указанными характеристиками выявлены наиболее стабильные формы связи (механические), имеющие физическую природу. Этим связям соответствует самый простейший тип конструкции со стержневой структурой. Для определенности принято, что такие конструкции создавались в условиях действия средних технических норм (расчетных, конструктивных, технологических, эксплуатационных и т.д.).

В решении задачи о взаимосвязях исходных характеристик, подобное усреднение давало более грубое решение, но избавляло от необходимости учитывать многочисленные и не всегда достоверные факторы и связи технического (субъективного) происхождения.

Ориентация на физическую сущность характеристик и связей позволила применить для решения задачи метод анализа размерностей.

В результате получена совокупность из двух взаимосвязанных обобщенных характеристик в виде пропорциональной зависимости относительного диаметра (основного функционального параметра) N от условного объемного веса (плотности) m . При этом коэффициент пропорциональности в виде постоянной КИОВ (коэффициента использования объемного веса) M имел одно и то же значение для всего интервала размеров.

Зависимость нашла количественное подтверждение в данных реальных конструкциях.

Используя постоянную M_0 как главный критерий оптимизации, выбраны другие размерные критерии: G_0 - оптимальный вес и V_0 - условный функциональный объем.

Критерий V_0 дал простое итоговое соотношение оптимальных геометрических характеристик для любого размера и постоянного значения веса G_0 .

Для наперед заданного ограничения веса было введено понятие коэффициента концентрации массы - η (отношение заданного или полученного веса $G_{оп}$ к его оптимальному значению G_0). В итоге оптимальные (по M_0) характеристики сформировались в два комплекса:

- основной (базовый), где действующие физические закономерности подчинялись предельным размерным критериям M_0, G_0 и V_0 при $\eta = 1$;
- общий (оптимальный при наперед заданном ограничении массы материала

лов $G_{оп} < G_0$), где снижение концентрации массы корректировалось соответствующими изменениями размерных критериев nG_0 , nV_0 и при M_0 , $n \leq 1$.

Главный критерий комплексов (безразмерное отношение КИОВ реализуемого к предельному) C позволяет дать однозначную комплексную оценку обобщенных качеств.

Кратко об особенностях комплексов.

Для достижения главным критерием M_0 своего предельного значения (при любом расходе массы) оптимальные характеристики не достигают своих физических пределов. Следовательно, в комплексах мы имеем взаимосвязанные, но средние величины характеристик.

Не менее важной особенностью комплексов является инертность удельной массы (ρ_0) для каждого размера (объема). Эта особенность позволяет представить главный критерий через отношение оптимальной удельной массы (расчетной и предельной) к её реализуемому значению.

Безразмерный критерий и комплекс оптимальных характеристик при оценке качеств антенн дают ряд преимуществ:

1. Появляется возможность оценивать обобщенные качества конструкций (со статическим характером связей), что открывает новые пути в улучшении и совершенствовании созданных ранее конструкций.

2. Упрощается процесс создания новых антенн того же вида, так как анализ решений на любой стадии создания конструкций ориентирован на обобщенные и взаимосвязанные критерии, а это сокращает время выбора нужных вариантов.

3. Выявляется основа для разработки подобных критериев и комплексов для конструкций с другими видами связей, формами элементов и принципами, т.е. для антенн отнесенных в данной работе к условному классу специальных конструкций.

4. Вооружает конструктора систематизированными представлениями об антеннах, определяет пути их дальнейшего совершенствования и представляет возможность предварительно прогнозировать конечные результаты трудоемких проектных математических расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций.

Следовательно, в оценке результатов машинного счета конструктор может ориентироваться на данные предлагаемых комплексов.

Главное, применяя комплексы для оценки частных и общих качеств конструкций, необходимо тщательно соблюдать, чтобы анализируемые характеристики не отличались бы по смыслу и содержанию от оптимальных.

Это касается прежде всего характеристик веса и погрешности поверхности.

Следует особо подчеркнуть, что погрешность поверхности является в сущности меняющейся по величине характеристикой. Она изменяется в процессе работы антенны в зависимости от её положения и, более того, может постепенно увеличиваться в зависимости от условий и длительности эксплуатации.

В дальнейшем с появлением методов контроля, способных измерять погрешность в любом пространственном положении, с совершенствованием расчетных программ достоверность и точность данных об этой характеристике будет выше.

В настоящее время комплексы критериев проверены на конкретном проекте предварительно-напряженной вантово-стержневой антенны радиотелескопа НИРФИ РТРС-36. Критерии комплекса дали одни и те же количественные результаты, что и численные расчеты на ЭВМ.

Расчёты показали, что при совершенствовании имеющегося программного обеспечения, при увеличении памяти машины и привлечении более оперативных средств ввода и вывода информации открывается реальная возможность перевести подобные расчеты на режим непосредственного диалога конструктора с машиной.

Комплексы ориентируют на уровень качества конструкций, определенный статической формой связи элементов конструкции. Меняя вид связей можно существенно повысить уровень обобщенных качеств. Например, применяя динамические или кинематические связи при соответствующих конструктивных изменениях антенны (предварительно-напряженных и гомологических), возможно значительно снизить удельную массу конструкции антенны. Тот же эффект дает ограничение поворота по углу места и защита конструкции от внешних воздействий.

В сущности критерии комплекса позволяют наглядно и просто показать, в какой мере и какой ценой специальные конструктивные средства улучшают обобщенные качества. Подробная оценка обобщенных качеств специальных антенн приведена в [6].

Главное то, что комплексы выявили стабильную взаимосвязь интересующих нас исходных характеристик, связь которая в той или иной мере действует в любой конструкции. Это позволяет надеяться, что эти комплексы критериев в дальнейшем найдут широкое применение в системном проектировании антенн.

Л и т е р а т у р а

1. Богомолов А.Ф. и др. О проблеме создания комплекса современных экономических радиотелескопов. - В сб.: Антенны / под ред. А.А. Пистелькорса, 1976, в. 24, с. 106 - 123.
 2. Бриджмен П.В. Анализ размерностей. / Пер. с англ. Л-М, ОНТИ ГТТИ, 1932, с. 41 - 51.
 3. Дитрих Я. Проектирование и конструирование - системный подход / Пер. с польского. - М.: Мир, 1982.
 4. Есапкина Н.А. и др. Радиотелескопы и радиометры. - М.: Наука, 1973, с. 58 - 99.
 5. Исследование конструкций и определение предельных параметров напряженных вантовых антенн радиотелескопов: Отчёт / НИРФИ; Рук. работы И.В. Мосалов. № ГР 74004396; Инв. № Б627260. - Горький, 1977.
 6. Разработка и исследование крупных вантово-стержневых полноповоротных зеркальных антенн: Отчёт / НИРФИ; Рук. работы В.А. Разин, № ГР 81039599; Инв. № 0.283.00.38.572. - Горький, 1982.
 7. Теория прогнозирования и принятие решений: Учебное пособие. / Под ред. С.А. Саркисяна. - М.: Высшая школа, 1977.
 8. Харинский А.Л. Основы конструирования элементов радиоаппаратуры. - Л.: Энергия, 1971, с. 12 - 44.
 9. S.von Hoerner. Design of large steerable antennas. - Astron.J., 1967, v.72, N 1, p.35 - 47.
 10. Орлов П.И. Основные конструирования: Справочно-методическое пособие. В 3-х книгах. М.: Машиностроение, 1977 - Кн. I, с. 100 - 197.
- II. Project cyclops. A Design Study of a System for Detecting Extraterrestrial Intelligent Life, Prepared Under Stanford (NASA) Ames Research Center 1971 Summer Faculty Fellowship Program in Engineering Systems Design.

Дата поступления статьи

12 мая 1985 г.

Игорь Васильевич Мосалов

**КОМПЛЕКСНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ОБОБЩЕННЫХ КАЧЕСТВ
ПОЛНОПОВОРОТНЫХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН (РЕФЛЕКТОРОВ) РАДИОТЕЛЕСКОПОВ**

Подписано к печати 07.08.85 г. МЦО1807. Формат 60 x 84 1/16. Бумага писчая.
Печать офсетная. Объем 1,4 усл. печ. л. Тираж 120. Заказ 4254. Бесплатно.

Отпечатано на ротационной НИРФИ