



Рис. 3. Результаты измерений фазового сдвига на профиле, проходящем над рудным телом (кривая 1) и на большом удалении от него при аналогичных условиях измерений (кривая 2). Расстояние между соседними точками профиля 5 м; n — номер точки измерения; стороны токовой петли расположены между точками 5, 6 и 24, 25 профиля (см. кружки на оси n). Сплошные линии — средние значения фазового сдвига; вертикальные линии — проекции границ рудного тела

ность применить фазовые методы измерений в индукционной электроразведке на низких частотах с синхронизацией по сигналам GPS-приемников для выявления малоконтрастных электромагнитных аномалий.

Литература

1. Сокол-Кутыловский О. Л., Сарвартинов А. И. Фазовый метод электроразведки с накоплением сигнала и GPS-синхронизацией // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журнал. 2013. № 3. С. 133—137.
2. Сокол-Кутыловский О. Л., Сарвартинов А. И. Фазовые измерения с синхронизацией по сигналам GPS-приемников // Датчики и системы. 2012. № 5. С. 48—52.

Дата принятия 04.10.2013 г.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

623.6-523.8:623.4.017

Математическая модель расчета надежности невосстанавливаемых фазированных антенных решеток

В. В. КОСТАНОВСКИЙ

Научно-исследовательский институт «Квант», Киев, Украина,
e-mail: valerij-kostanovskij@rambler.ru

Предложена новая модель расчета надежности невосстанавливаемых фазированных антенных решеток и проведено сравнение ее с традиционной моделью как резервированной невосстанавливаемой структуры с нагруженным скользящим резервом. Даны рекомендации по применению новой модели в процессе проектирования радиолокационных станций, содержащих более 200 сверхвысокочастотных элементов.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, показатели надежности, вероятность безотказной работы.

The new model for reliability calculation the of nonrecoverable phased array antennas is proposed and its comparison with the traditional model as a redundant nonrecoverable structure with loaded sliding reserve is carried out. The recommendations for new model application in the design of radar stations with more than 200 microwave components are given.

Key words: phased antenna array, reliability indicators, probability of troubleproof operation.

Современные радиолокационные станции (РЛС) характеризуются высокой эффективностью применения в результате широкого использования фазированных антенных решеток (ФАР) с большим (до десяти тысяч) количеством сверхвысокочастотных (СВЧ) модулей. К таким РЛС относятся американские AN/SPY-1 А, В или D системы Aegis (Иджис), российские «Дон», «Воронеж» и др. Высокая надежность ФАР в РЛС обеспечивается введением дополнительной (несколько процентов) избыточности в структуру антенной решетки [1].

Для расчета показателей надежности ФАР используют традиционную модель резервированной невосстанавливаемой структуры с нагруженным скользящим резервом [2] и методы расчета надежности ветвящихся структур [2, 3]. Однако применяемые в [2, 3] аналитические выражения для показателей надежности ФАР становятся громоздкими и практически малоприменимыми для проведения дальнейшего анализа при большом количестве (более 200) СВЧ элементов в ФАР. Поэтому у разработчиков РЛС имеется настоятельная потребность в простых и удобных моделях для проведения анализа надежности ФАР.

Цель статьи — построение новой модели расчета надежности невосстанавливаемой ФАР и сравнение ее с традиционной моделью как резервированной невосстанавливаемой структуры с нагруженным скользящим резервом; определение погрешности при использовании новой и традиционной математических моделей для точного и приближенного расчета.

Математическая модель надежности резервированной невосстанавливаемой структуры со скользящим резервом, состоящей из n рабочих и m резервных элементов, определяется формулами для вероятности безотказной работы $P_c(t_0)$ и средней наработки до первого отказа T_{0c} [1, табл. 4.3, с. 46]. Точное и приближенное выражения для $P_c(t_0)$ при произвольном законе распределения наработки идентичных элементов до отказа имеют вид

$$P_c(t_0) = \sum_{j=0}^m C_{n+m}^j p^{n+m-j} q^j; \quad (1)$$

$$P_c(t_0) \approx 1 - C_{n+m}^{m+1} q^{m+1}, \quad (2)$$

где $p = p(t_0)$, $q = q(t_0)$ — вероятности соответственно безотказной работы элемента и его отказа за оперативное время t_0 .

Точное и приближенное выражения для T_{0c} при экспоненциальном законе распределения наработки идентичных элементов до отказа:

$$T_{0c} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^m \frac{1}{n+m-j}; \quad (3)$$

$$T_{0c} \approx \frac{1}{\lambda_0} \left[\ln \left(\frac{n+m}{n} \right) - \frac{m}{n(n+m)} \right], \quad (4)$$

где λ_0 — интенсивность отказов идентичных элементов.

Для разработки новой математической модели надежности невосстанавливаемой ФАР примем следующее:

структура невосстанавливаемой ФАР, находящейся в начальный момент времени ($t_0 = 0$) в исправном состоянии, включает $N(0) = n + m$ работоспособных СВЧ-элементов;

критерием отказа невосстанавливаемой структуры ФАР является отказ $m+1$ -го элемента в момент времени $t_0 = T_0$, т. е. выполнение условия

$$N(t_0) = N(0) - m - 1,$$

а если учесть, что $N(t_0) = n + m$, то получим

$$N(t_0) = n - 1. \quad (5)$$

Общее число работоспособных элементов в резервированной структуре ФАР также можно определить через вероятность безотказной работы

$$N(t_0) = N(0)P(t_0). \quad (6)$$

При экспоненциальном законе распределения наработки на отказ элементов ФАР выражение (6) преобразуется как

$$N(t_0) = (m + n) \exp(-\lambda_0 t_0). \quad (7)$$

Используя (5) и (7), получим уравнение для определения средней наработки до первого отказа невосстанавливаемой структуры ФАР:

$$(m + n) \exp(-\lambda_0 t_0) = n - 1. \quad (8)$$

Из решения уравнения (8) относительно $t_0 = T_0$ можно найти выражение для средней наработки до первого отказа:

$$T_{0c}^{-1} = \lambda_0^{-1} \ln[(m + n) / (n - 1)]. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет вывести приближенные формулы для расчетной оценки вероятности безотказной работы при экспоненциальном и нормальном законах распределения наработки на отказ невосстанавливаемой структуры ФАР:

$$P_c(t) \approx \exp(-t_0 / T_{0c}); \quad P_c(t) \approx \Phi[T_{0c} - t_0 / \sigma_t]. \quad (10)$$

Из сравнения (3), (9) следует, что формула (9) удобнее для инженерного анализа надежности ФАР (средней наработки до первого отказа) при количестве 200 и более элементов в структуре. Чтобы сравнить традиционную и новую математические модели, рассмотрим примеры расчета показателей надежности для трех резервированных структур ФАР с нагруженным скользящим резервом. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета показателей надежности для различных структур ФАР

Вариант структуры	Оперативное время работы t_0 , ч	Интенсивность отказов λ , ч ⁻¹	Количество элементов	
			основных	резервных
ФАР1	500	10	10	2
ФАР2	500	5	96	4
ФАР3	500	0,5	480	20

Для традиционной модели расчета надежности указанной резервированной структуры по (3), (4) вычисляем точное и приближенное значения средней наработки до первого отказа структуры ФАР, а по (1) — точное значение вероятности безотказной работы при экспоненциальном законе распределения наработки на отказ СВЧ-элементов ФАР.

Для новой модели расчета надежности ФАР по (7) находим значения средней наработки до первого отказа, а по (8), (9) — приближенные значения вероятности безотказной работы при экспоненциальном и нормальном законах распределения наработки на отказ структуры ФАР. Результаты расчетов средней наработки до первого отказа и вероятности безотказной работы за оперативное время работы структуры ФАР приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Средняя наработка до первого отказа различных структур ФАР

Вариант структуры	Точное значение, рассчитанное по модели		Приближенное значение, рассчитанное по традиционной модели
	традиционной	новой	
ФАР1	2842	2876	1656
ФАР2	1021	1026	808
ФАР3	8572	8581	8148

Таблица 3

Вероятность безотказной работы для различных структур ФАР

Вариант структуры	Точное значение, рассчитанное по традиционной модели	Приближенное значение, рассчитанное по модели		
		традиционной	новой для экспоненциального распределения	новой для нормального распределения
ФАР1	0,982	0,9744	0,840	0,993
ФАР2	0,894	–1,94	0,614	0,938

В табл. 4, 5 представлены относительные погрешности определения показателей надежности ФАР, рассчитанные по приближенной и точной формулам для традиционной и новой моделей.

Таблица 4

Относительная погрешность определения средней наработки до первого отказа для различных структур ФАР

Вариант структуры	Относительная погрешность, %, рассчитанная по формуле	
	приближенной для традиционной модели	точной для новой модели
ФАР1	41,0	1,20
ФАР2	20,8	0,51
ФАР3	4,95	0,10

Таблица 5

Относительная погрешность определения вероятности безотказной работы для различных структур ФАР

Вариант структуры	Относительная погрешность, %, рассчитанная по приближенной формуле для модели		
	традиционной	новой при распределении	
		экспоненциальном	нормальном
ФАР1	0,77	14,5	1,12
ФАР2	217	31,3	1,23

Из табл. 4 следует, что использование приближенной формулы (4) для определения средней наработки до первого отказа структуры ФАР приводит к большой погрешности 5—41 %, которая уменьшается с увеличением количества элементов в резервированной структуре. Применение формулы (8), полученной для новой модели, дает значительно меньшую погрешность 0,1—1,2 %, которая быстро уменьшается с увеличением количества элементов.

В соответствии с табл. 5 вычисление вероятности безотказной работы по (2) приводит или к большим погрешностям (вариант ФАР1) или невозможности получения правильной оценки (вариант ФАР2). Приближенные значения вероятности безотказной работы, рассчитанные по (9), (10), дают более точные оценки. Использование экспоненциального распределения наработки до отказа структуры ФАР позволяет получить менее точную нижнюю оценку вероятности безотказной работы, а в случае нормального распределения можно найти верхнюю более точную оценку. Из табл. 5 также следует, что вероятность безотказной работы невосстанавливаемой структуры ФАР хорошо описывается приближенной формулой (10), полученной в рамках новой модели для нормального распределения наработки до отказа; относительная погрешность равна 1,12—1,23 %.

Выводы. Представлена новая математическая модель для расчета надежности ФАР как резервируемой невосстанавливаемой структуры. Приведены новые, более удобные для инженерного анализа (при числе элементов в структуре ФАР более 200), формулы для расчетной оценки показателей надежности: средней наработки до первого отказа и вероятности безотказной работы. Применение новой модели расчета обеспечивает небольшие (в пределах инженерной точности) погрешности при определении показателей надежности. Для вычисления более точных оценок вероятности безотказной работы структуры невосстанавливаемой ФАР целесообразно использовать нормальное распределение наработки на отказ.

Рассмотренную в статье математическую модель расчета надежности ФАР рекомендуется применять в процессе проектирования новых радиолокационных станций с ФАР, имеющих более двухсот СВЧ-элементов.

Литература

1. Суранов А. А., Ниеталин Ж. Н., Джаманшалов М. У. Исследование активных фазированных антенных решеток. Казахский национальный техн. ун-т им. К. И. Сатпаева, 2012. С. 1—6.
2. Беляев Ю. К. и др. Надежность технических систем: Справ. пособие / Под ред. А. И. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. С. 46, 117.
3. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб: Питер, 2005. С. 212—218.

Дата принятия 13.11.2013 г.