

6. Ponomarev G.A., Kulikov A.M., Tel'pukhovskiy E.D. Rasprostraneniye UKV v gorode [The distribution of VHF in the city]. Tomsk: MP «Rasko», 1991, 222 p.
7. Milyutin E.R. i dr. Metody rascheta polya v sistemakh svyazi detsimetrovogo diapazona [Methods of calculation fields in communication systems UHF]. St. Petersburg: Triada, 2003, 159 p.
8. Kisel' N.N., Grishchenko S.G., Kardos D.A. Optimizatsiya parametrov kombinirovannoy mikropoloskovoy anteny [Optimisation dual-resonant patch antenna], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 25-31.
9. Panychev A.I. Algoritm trekhmernoy trassirovki radiovoln lokal'noy besprovodnoy seti [The algorithm of three-dimensional trace radio waves wireless lan], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 31-41.
10. Panychev A.I. Trassirovka mnogoluchevogo rasprostraneniya radiovoln vnutri zdaniy [Tracing of multipath radio propagation inside buildings], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya «Obshchie voprosy radioelektroniki (OVR)»*. Nauchn.-tekhn. sbornik [Issues of special electronics. A series of General questions Radioelectronics (OVR)". .technology. collection. Moscow-Taganrog, 2012, Issue 1, pp. 182-187.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Карелин.

Панычев Андрей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: ruu2011@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634 371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Panychev Andrey Ivanovich – Southern Federal University, e-mail: ruu2011@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters, cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.396.677

Н.В. Шацкий, С.А. Головань, А.Г. Стрижак, В.Н. Шацкий

МЕТОД КОНТРОЛЯ МОНОИМПУЛЬСНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Широкое использование фазированных антенных решеток в радиолокации, ужесточающиеся требования по помехозащищенности, реализованное обеспечение постоянного мониторинга пространства вызывают необходимость разработки новых методов контроля антенной системы. На основе оригинального подхода и технических решений предлагаются методические основы подхода к построению систем оперативного контроля малоэлементной ФАР радиопеленгатора при пеленгации цели как с известными, так и неизвестными координатами, обеспечивающего независимость от режима работы самого пеленгатора. Предлагаемый метод контроля наиболее эффективен для оценки работоспособности фазированной антенной решетки с небольшим числом каналов (при увеличении числа элементов растет погрешность определения искомым параметров). Метод не имеет ограничений и может быть без особых затруднений реализован в существующих радиотехнических системах с современными системами когерентного распределения сигналов дискретизации, синхронизации, гетеродина и контрольного сигнала, а также системой цифровой обработки радиолокационных сигналов.

Фазированная антенная решётка; моноимпульсная радиолокация; диаграмма направленности; отказы; координаты объекта; дальность действия; пеленг цели; метод контроля; синхронное изменение фазы.

N.V. Shatsky, S.A. Golovan, A.G. Strizhak, V.N. Shatsky

CONTROL METHOD MONOPULSE PHASED ANTENNA ARRAYS

Extensive use of phased arrays in radar, higher requirements for immunity, implemented to ensure continuous monitoring of space make it necessary to develop new methods to control the antenna system. On the basis of the original approach and technical solutions, methodical approach to building the foundations of operational control small element PAR finder at DF objectives, both with known and unknown coordinates, providing independence from the operating mode of the finder are offered. The proposed control method is most effective to evaluate the health of phased antenna array with a small number of channels (as the number of elements increases the error in the determination of unknown parameters). This method has no restrictions and can be easily implemented in existing radio systems with modern systems of coherent signal distribution of sample rate, synchronization, lo and control signal and digital processing of radar signals.

A phased array antenna; monopulse radar; directional pattern; cracks; object coordinates; range; target bearing; method of control; synchronous phase change.

Использование фазированных антенных решеток (ФАР) определяет дополнительные технические возможности радиотехнических систем (РТС) в сложной, меняющейся во времени помеховой обстановке и реализации усложняющихся требований к ее характеристикам. Однако это обстоятельство обуславливает и ряд негативных моментов. С одной стороны, ФАР – достаточно сложная система, одной из проблем которой является обеспечение надежности. С другой стороны, использование в составе ФАР активных элементов в условиях массивированного применения средств радиоэлектронной борьбы приводит не только к ухудшению электромагнитной совместимости РТС (в частности, к снижению помехоустойчивости), но и к появлению отказов в каналах ФАР. Рассмотрим лишь влияние ошибок (отказов) в распределении поля по раскрытию ФАР на точность пеленгования. Как показано в известной литературе, в частности в [1], при возникновении ошибок в возбуждении ФАР наблюдается как смещение равносигнального направления, приводящее к погрешностям пеленгования, так и изменение пеленгационной чувствительности. Если для ФАР с большим числом элементов возбуждение можно представить в виде непрерывных функций и использовать нормальный закон распределения для фазовых и амплитудных ошибок поля возбуждения, то для малоэлементных ФАР это не всегда справедливо.

Определяющими параметрами для моноимпульсной радиолокации являются жесткие требования к крутизне формируемой диаграммы направленности (ДН) антенны в равносигнальном направлении, которая существенным образом влияет на точность измерения координат объекта и дальность действия. Крутизна (или связанный с ней наклон касательной к функции ДН) характеризуется производной ДН по полю $(\vec{F}_0(\theta, \varphi))'_\theta$. Во время функционирования ФАР, вследствие появления амплитудных или фазовых ошибок (вызванных процессами различной природы), крутизна, как и сама, диаграмма направленности, изменяется и принимает вид

$$tq\alpha = (\vec{F}_0(\theta, \varphi))'_\theta + \Delta a_m [\vec{\mu}_m(\theta, \varphi) \exp i(\varphi_m + \Delta \psi_m)]'_\theta, \quad (1)$$

где $\Delta a_m(\Delta \psi_m)$ – ошибка реализации амплитуды (фазы) возбуждения в m -м канале ФАР; $\vec{\mu}_m(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности m -го излучателя; φ_m – фаза тока возбуждения в m -м излучателе.

Для ошибки реализации амплитуды в m -м канале выражение (1) может быть записано следующим образом:

$$tq\alpha_A = \left(\bar{F}_0(\theta, \varphi)\right)_\theta + \Delta a_m \left(\bar{\mu}_m(\theta, \varphi)\right)_\theta \exp(i\varphi_m). \quad (2)$$

Отказы секций фазовращателей (ФВ) также оказывают влияние на крутизну ДН ФАР. При их учете выражение (1) изменяется на

$$tq\alpha_\phi = \left(\bar{F}_0(\theta, \varphi)\right)_\theta + A_m \left(\bar{\mu}_m(\theta, \varphi)\right)_\theta \exp(i\varphi_m) \exp(\Delta\psi_m). \quad (3)$$

Используя основные соотношения теории вероятности и выражения (2) и (3), были получены выражения для статистических характеристик крутизны ДН при наличии ошибок реализации амплитуды и фазы в каналах ФАР при произвольном законе распределения и ошибках, соизмеримых по величине с управляющим воздействием.

Выражения для статистических характеристик крутизны позволяют исследовать изменения пеленгационной чувствительности на примере ФАР 8-8 излучателей. Необходимо отметить, что формирование амплитудно-фазового распределения (АФР) в каналах решетки реализовано с помощью дискретных (четырёхсекционных) аттенуаторов и фазовращателей бинарного типа. Исследования охватывают оценку отклонения луча и крутизну пеленгационной характеристики ФАР при рассеянных отказах амплитудного и фазового трактов управления в ее каналах. При этом выявлено, что наибольший вклад в среднеквадратическое отклонение луча и крутизну вносят крайние элементы раскрыва антенной решетки. При этом применение различных законов амплитудного и фазового распределения вносят коррективы в перераспределение весов элементов раскрыва антенны. При оценке отказов аттенуаторов (на основе выражения (2)) в каналах квадратной ФАР (по дисперсии отклонения луча $D\{\Delta\theta\}$ от ширины $2\theta_{0,5}$) максимально определяется

уровнем $0,12 \left(\frac{D\{\Delta\theta\}}{2\theta_{0,5}} \right)$; а при оценке фазовых отказов (на основе выражения (3))

– $0,134 \left(\frac{D\{\Delta\theta\}}{2\theta_{0,5}} \right)$. Исследования рассеянных отказов шестидесятичетырехэле-

ментной ФАР на крутизну оценивалась как отношение дисперсии крутизны при отказах ($D\{tq\alpha\}$) к крутизне ДН исправной антенной решетки ($tq\alpha_0$). При этом амплитудные отказы приводят к максимальному изменению крутизны, равному примерно $5,14 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D\{tq\alpha\}}{tq\alpha_0} \right)$; а фазовые характеризуются – $8,4 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D\{tq\alpha\}}{tq\alpha_0} \right)$.

Также необходимо отметить, что приведенные максимальные отклонения луча ФАР и ее крутизны при фазовых отказах приведены для равномерного амплитудного распределения, а использование в каналах различных спадающих распределений уменьшает эту величину незначительно (примерно на 5÷10 %). Таким образом, даже поверхностная оценка только двух показателей при рассеянных отказах, выявила необходимость оперативного устранения ошибок реализации амплитуды и фазы в каналах ФАР, вызванных различными причинами.

Сказанное выше обусловило потребность разработки методов оперативного контроля ФАР в составе РТС независимо от основного режима последней, т.е. в дежурном режиме [1, 2]. Анализ существующих методов контроля ФАР, включая и контроль ФАР в составе РТС, показывает, что ни один из основных известных классов систем контроля ФАР: вынесенного, встроенного и модуляционного контроля, а также контроля на основе низкочастотной модуляционной фильтрации – не отвечает в полной мере требованию оперативности диагностирования РТС с ФАР при функционировании в дежурном режиме. Широко применяемый для про-

верки РТС корреляционный метод, основанный на использовании случайных испытательных сигналов, например М-последовательностей, описании динамики объекта контроля через уравнение Винера-Хопфа и последующей оценке состояния объекта по отклику автокорреляционной функции в рабочей полосе частот [2, 5] не в полной мере отвечает поставленным условиям, так как при использовании данного метода для контроля ФАР возникают трудности, обусловленные, в первую очередь, снижением помехоустойчивости РТС, в которой функционирует ФАР.

В [6, 7] применительно к РТС информационного и метрического классов рассмотрен метод контроля ФАР РТС в дежурном режиме. Метод основан на синхронном изменении фазы проходящих через каналы излучателей сигналов на одинаковую величину, равную дискрету каждого разряда ФВ, в промежутках между измерениями основного параметра, характеризующего данную РТС, сравнении результатов измерений, полученных в разных циклах, с эталонным значением основного параметра или между собой и определении исправности (неисправности) ФАР на основе сравнения результатов измерений.

Рассмотрим реализацию метода на примере ФАР радиопеленгатора. Основными параметрами, характеризующими радиопеленгатор, являются время и точность пеленгования. Время определяется временем накопления сигнала в каждой точке, т.е. числом измерений, а точность пеленгования – при наличии цели с заранее заданными параметрами – оценкой пеленга данной цели.

Как показано в [1, 8], для антенной решетки из M -излучателей, диаграммы каждого из которых описываются функцией вида

$$\bar{\mu}_m(\theta, \varphi) = \bar{\theta}\mu_m^\theta(\theta, \varphi) + \bar{\varphi}\mu_m^\varphi(\theta, \varphi),$$

где μ^θ, μ^φ – соответственно θ и φ компоненты диаграммы направленности (ДН) одиночного излучателя ($\bar{\theta}, \bar{\varphi}$ – орты и отсчет углов θ и φ в сферической системе координат соответствуют общепринятым), ДН может быть представлена в виде выражения

$$\bar{F}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M A_m \exp(i\varphi_m) \bar{\mu}_m(\theta, \varphi), \quad (4)$$

где A_m, φ_m – соответственно, амплитуда и фаза тока возбуждения в m -м излучателе.

С учетом возможных отказов устройств управления в каналах ФАР (например, одного или нескольких разрядов в одном или в группе K -разрядных фазовращателей) выражение для ДН ФАР можно представить следующим образом [8]:

$$\bar{F}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M (A_{0m} + \Delta a_m) \exp[i(\varphi_{0m} + \Delta \psi_m)] \bar{\mu}_m(\theta, \varphi), \quad (5)$$

где A_{0m}, φ_{0m} – номинальные значения амплитуды и фазы в m -м канале ФАР; $\Delta a_m (\Delta \psi_m)$ – ошибка реализации (установки) амплитуды (фазы) возбуждения в m -м канале.

При замене линейного фазового распределения φ_0 ступенчатым распределением вида [1]

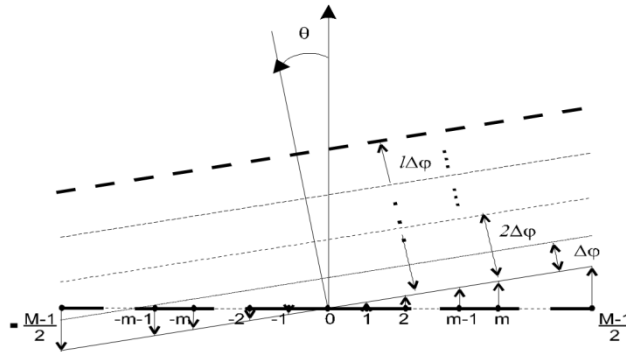
$$\varphi_{CTm} = \Delta \varphi \text{Ent}[\varphi_{0m} / \Delta \varphi + 0.5], \quad (6)$$

в котором $\text{Ent}[a]$ – целая часть числа a ; $\Delta \varphi$ – дискрет младшего разряда K -разрядного ФВ; выражение (2) преобразуется в следующее соотношение:

$$F_{CT}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M (A_{0m} + \Delta a_m) \exp[i(\varphi_{CT_m} + \Delta \psi_{CT_m})] \tilde{\mu}_m(\theta, \varphi), \quad (7)$$

где $\Delta \psi_{CT_m} = \Delta \psi_m + \delta \varphi_m$; $\delta \varphi_m$ – погрешность, обусловленная ступенчатым фазированием.

Если фазу проходящих через M каналов излучателей сигналов изменить на постоянную величину $\Delta \varphi_k$, где $k = (\overline{1, K})$, а $\Delta \varphi_k = 2\pi/2^k$, то, судя по выражению (7), направление главного максимума ДН (θ_0, φ_0) не изменится, так как величину $\exp(i \Delta \varphi_k)$ можно вынести за знак суммирования. Описанное выше графически подтверждается рисунком, где схематично представлен излучающий раскрыв из M элементов, фазовый фронт при отклонении главного максимума ДН от нормали (оси антенны) на угол θ и положения фазового фронта при синхронном изменении фазы проходящих через каналы излучателей сигналов на величину $\Delta \varphi = 2\pi/2^k$, $2\Delta \varphi = 2\pi/2^{k-1}$ и так далее до величины $l \Delta \varphi = 2\pi/2^1 = \pi$ для полностью исправной ФАР.



Рисунок

Считаем, что в k -м разряде ФВ возможны два вида отказа: отказ, когда m -ый ФВ не пропускает сигнал, то есть коэффициент передачи m -го канала $T_{mk}=0$, и случай, когда k -ый дискрет m -го фазовращателя не устанавливается, т.е. $T_{mk}=1$. Исправное состояние этого разряда ФВ характеризуется выражением вида $T_{mk} \exp(2\pi i / 2^k)$.

Обычно для получения пеленга цели радиолокационная станция обеспечивает k измерений в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_k . Считаем, что для контроля РЛС с ФАР используется цель с известными координатами, а априорная информация о положении цели (пеленг цели $v_{эм}$) введена в память ЭВМ управления и обработки данных. В момент времени t_1 определяется пеленг цели с координатами (θ_0, φ_0) при ориентации ДН ФАР в ее направлении, измеряется мощность сигнала на выходе ФАР, пропорциональная величине (4) и характеризующая пеленг цели. Полученный результат оценки v_0 сравнивается с эталонным $v_{эм}$, хранящимся в памяти ЭВМ, и также запоминается. Затем производится синхронное изменение фазы проходящих сигналов на величину дискрета младшего разряда ФВ, т.е. на $\Delta \varphi$ (выражение (3)), и вновь повторяется совокупность операций, обеспечивающая получение оценки пеленга v_1 . Сравнение v_1 с $v_{эм}$ позволяет сделать вывод о исправности младших разрядов ФВ в каналах ФАР. Затем осуществляется синхронное из-

менение фазы сигналов в каналах излучателей на величину $\left(2\pi l / 2^{(k-l)}\right)$, где $l = \overline{(0, K-1)}$, и вновь производится оценка пеленга v_l . Сравнение полученных оценок v_l пеленга цели с эталонным значением $v_{эм}$ позволяет оценить состояние ФАР в составе радиолокационной станции.

Подобный контроль ФАР возможен и при пеленгации цели с неизвестными координатами. Только в отличие от вышеописанного сравнение полученных оценок пеленга v_l производится между собой, а усреднение полученных результатов позволяет повысить точность измерений при признании ФАР исправной в \sqrt{k} раз.

При использовании ФАР в составе системы радиосвязи ее пригодность к дальнейшей работе оценивают по паразитной амплитудной модуляции суммарного сигнала на выходе приемника системы при синхронном изменении фазы проходящих через каналы излучателей сигналов на одинаковую величину, равную дискрету каждого разряда фазовращателя.

Предложенный метод оперативного контроля может быть использован в основном для оценки работоспособности ФАР РТС с небольшим числом каналов (100...1000), так как с увеличением числа элементов растет погрешность определения искомых параметров. Метод не имеет ограничений и может быть без особых затруднений реализован в существующих РТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Самойленко В.И., Шишов Ю.А.* Управление фазированными антенными решетками. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
2. *Грановский В.А.* Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
3. *Бубнов Г.Г., Никулин С.М., Сeryakov Ю.Н., Фурсов С.А.* Коммутационный метод измерения характеристик ФАР. – М.: Радио и связь, 1988. – 120 с.
4. Авторское свидетельство 675377. Способ контроля фазированной антенной решетки / В.А. Волошин, Б.Д. Мануилов, В.В. Шацкий.
5. *Шацкий В.В., Голуб В.В., Шацкий Н.В.* Контроль работоспособности широкополосных радиоприемных систем // Вопросы радиоэлектроники, сер.: ОВР. – 1998. – Вып. 18. – С. 210-216.
6. Авторское свидетельство 1015315А. Способ контроля фазированной антенной решетки / Б.Д. Мануилов, В.В. Шацкий.
7. Патент 2117308. Способ контроля фазированной антенной решетки радиопеленгатора / Б.Д. Мануилов, Н.В. Шацкий.
8. *Шацкий Н.В., Головань С.А., Стрижак А.Г., Шацкий В.Н.* Система управления техническим состоянием малоэлементных фазированных антенных решеток на основе модели антенной решетки при наличии ошибок реализации фазы в ее каналах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 1 (150). – С. 19-28.

REFERENCES

1. *Samoylenko V.I., Shishov Yu.A.* Upravlenie fazirovannymi antennymi reshetkami [Management of phased antenna arrays]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 240 p.
2. *Granovskiy V.A.* Dinamicheskie izmereniya: Osnovy metrologicheskogo obespecheniya [Dynamic measurement: Fundamentals of metrological support]. Leningrad: Energoatomizdat, 1984, 224 p.
3. *Bubnov G.G., Nikulin S.M., Seryakov Yu.N., Fursov S.A.* Kommutatsionnyy metod izmereniya kharakteristik FAR [The switching method of measuring characteristics of the HEADLIGHTS]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 120 p.
4. Avtorskoe svidetel'stvo 675377. Sposob kontrolya fazirovannoy antennoy reshetki [The method of controlling a phased antenna array], V.A. Voloshin, B.D. Manuilov, V.V. Shatskiy.

5. *Shatskiy V.V., Golub V.V., Shatskiy N.V. Kontrol' rabotosposobnosti shirokopolosnykh radiopriemnykh sistem [Health monitoring broadband radio systems], Voprosy radioelektroniki, ser.: OVR [Questions of Radioelectronics, series: OVR], 1998, Issue 18, pp. 210-216.*
6. *Avtorskoe svidetel'stvo 1015315A. Sposob kontrolya fazirovannoy antennoy reshetki [The method of controlling a phased antenna array], B.D. Manuilov, V.V. Shatskiy.*
7. *Patent 2117308. Sposob kontrolya fazirovannoy antennoy reshetki radiopelengatora [The method of controlling a phased antenna array], B.D. Manuilov, N.V. Shatskiy.*
8. *Shatskiy N.V., Golovan' S.A., Strizhak A.G., Shatskiy V.N. Sistema upravleniya tekhnicheskimi sostoyaniem maloelementnykh fazirovannykh antennykh reshetok na osnove modeli antennoy reshetki pri nalichii oshibok realizatsii fazy v ee kanalakh [System for control of technical condition of small element phased arrays based on the model of the antenna array if there are errors during the implementation phase in its channels], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 1 (150), pp. 19-28.*

Статью рекомендовал к публикации д.ф.-м.н., профессор В.И. Корчагин.

Шацкий Николай Витальевич – Научно-исследовательский институт физики ЮФУ; e-mail: shatskiy@sfedu.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194; тел. (факс): 88632975041, 89044443467; старший научный сотрудник; к.т.н.; доцент.

Головань Сергей Анатольевич – Факультет военного обучения ЮФУ; e-mail: gsa@sfedu.ru; 344094, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40; начальник кафедры связи; к.ф.н.

Стрижак Александр Георгиевич – заместитель начальника кафедры связи.

Шацкий Виталий Николаевич – Физический факультет ЮФУ; e-mail: shik-93@rambler.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5; студент 4 курса.

Shatskiy Nikolay Vitalievich – Research Institute of physics, southern Federal University; e-mail: shatskiy@sfedu.ru; 194, etc. Stachki (Strikes), Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone (fax): 88632975041; senior research officer; cand. of eng. sc.; associate professor.

Golovan Sergey Anatolievich – Military faculty of southern Federal University; e-mail: gsa@sfedu.ru; 40, R. Zorge street, Rostov-on-Don, 344094, Russia; the chief of department of communication; cand. of philol. sc.

Strizhak Alexander Georgievich – deputy head of the department of communication.

Shatskiy Vitaly Nikolayevich – The physics department of Southern Federal University; e-mail: shik-93@rambler.ru; 5, R. Zorge street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; fourth-year student.

УДК 621.3.091.1

Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Рассмотрена возможность использования для медицинской диагностики информационного параметра степени деполаризации зондирующей волны, прошедшей сквозь ткань с ярко выраженной анизотропией диэлектрических свойств. Отличительной особенностью биологической ткани является ее структурированность, обусловленная наличием большого количества тонких волокон, образующих регулярную систему. Модельная задача представляет собой среду с анизотропными свойствами в виде сетки из резистивных нитей. Расчеты показали, что существует оптимальная частота измерений, на которой обеспечивается наибольшее затухание совпадающей и максимальное значение кроссполаризационной компонент. При этом деполаризация также достигает максимума. Коэффици-