

Г. А. Профатилова, Г. Н. Соловьев

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА МЕСТА В ДВУХКООРДИНАТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ

Исследован метод амплитудно-фазового измерения угла места применительно к двухкоординатным трассовым и аэродромным радиолокационным станциям службы управления воздушным движением. Показано, что потенциальная точность этого метода достаточно высока для практического применения. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность метода. Исследован двухчастотный метод устранения неоднозначности измерений, связанных с цикличностью фазы.

Увеличение интенсивности воздушного движения влечет за собой повышение требований к информативности радиолокационных станций службы управления воздушным движением. Традиционно в системе управления воздушным движением широко используются двухкоординатные радиолокационные станции (РЛС), имеющие высокую разрешающую способность по дальности и азимуту, но не обеспечивающие измерения высоты полета воздушных объектов. Обычно высота полета воздушных объектов определяется по данным бортового ответчика. Очевидно, что в экстремальных ситуациях на борту нет гарантии работы ответчика. Кроме этого, если летательный аппарат находится в пересечении зон ответственности нескольких РЛС, бортовые ответчики, как правило, не обеспечивают ответ всем РЛС, входящим в состав системы управления воздушным движением. Поэтому возможность измерения высоты (или угла места) воздушных объектов в традиционных двухкоординатных РЛС может существенно повысить качество поставляемой такими РЛС информации.

В настоящей работе рассмотрен метод измерения угла места в двухкоординатных РЛС серии "Утес", выпускаемых в трассовой и аэродромной модификациях. Обе модификации РЛС имеют широкую диаграмму направленности антенны в угломестной плоскости (до 45°). Особенностью РЛС этой серии является использование двух диаграмм направленности (лучей), совпадающих в азимутальной плоскости и сдвинутых по углу места на небольшой угол (порядка $2-3^\circ$). Излучение ведется по одному лучу (например, нижнему лучу), а прием по двум лучам (верхнему и нижнему). Конструктивно два приемных луча реализуются за счет использования двух разнесенных по вертикали

рупоров в фокальной плоскости параболического зеркала. Наличие двух фазовых центров приема и перекрытие диаграмм направленности лучей в широком секторе позволяет использовать для измерения угла места объекта амплитудно-фазовый метод.

Амплитудно-фазовый метод измерения угла падения фронта волны на раскрыв антенны известен давно [1, 2], но не нашел применения в рассматриваемых РЛС ввиду высоких требований к фазовой стабильности приемо-передающих и антенно-волноводных трактов РЛС.

В ходе модернизации РЛС серии “Утес” была существенно повышена фазовая стабильность приемо-передающих трактов за счет использования современных методов цифровой обработки сигналов начиная с промежуточной частоты. Проведенная модернизация РЛС в сочетании с особенностями двухлучевого приема сделала возможной реализацию амплитудно-фазового метода измерения угла места в РЛС серии “Утес”.

Рассмотрим основные положения метода. Фазовые центры облучающих рупоров антенны (рис. 1) разнесены по вертикали на расстояние l_p в фокальной плоскости зеркала, представляющего собой усеченный параболоид. Наличие зеркала приводит к увеличению эффективного разноса фазовых центров формируемых лучей (нижнего и верхнего) по сравнению с l_p до некоторого значения h . Заметим, что функциональная связь между h и l_p при рассмотрении метода не имеет принципиального значения. Величина h легко определяется экспериментально при юстировке измерителя. Поскольку расстояние между наблюдаемым воздушным объектом и РЛС достаточно большое по сравнению с величиной h , то можно полагать, что углы прихода фазовых фронтов к приемным

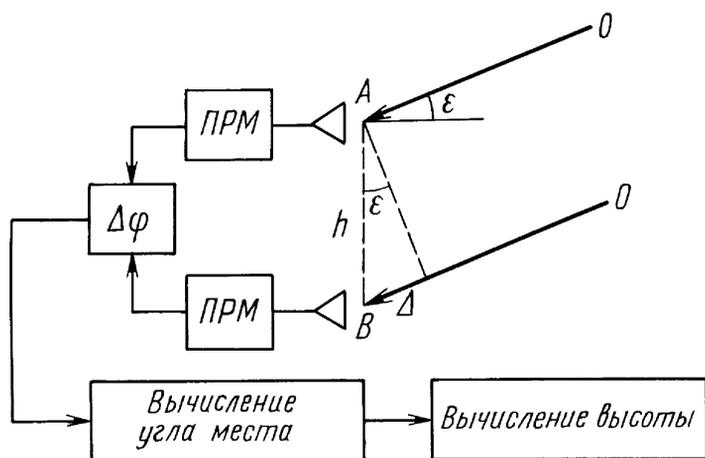


Рис. 1. Схема измерения угла места (ПРМ — приемник)

фазовым центрам одинаковы, т.е. лучи OA и OB параллельны.

Разность Δ хода лучей определяет фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ принятых сигналов в двух приемных лучах и может превышать длину волны λ . В силу этого измерение угла места ε с использованием фазового метода неоднозначно.

Угол места ε связан со сдвигом фазы $\Delta\varphi$ следующим соотношением:

$$\frac{h \sin \varepsilon}{\lambda} = \frac{\Delta\varphi + 2\pi k}{2\pi}, \quad (1)$$

где целое число k определяет номер интервала неоднозначности. Из выражения (1) следует

$$\varepsilon = \arcsin \left(\frac{\lambda}{h} \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} + k \right) \right). \quad (2)$$

Точность измерения угла места ε зависит от точности измерения фазового сдвига $\Delta\varphi$. Фазовый сдвиг сигналов в двух приемных каналах определяется исходя из следующих соотношений:

$$\dot{U}_1 = U_1 e^{j(\omega t + \varphi_1)}, \quad \dot{U}_2 = U_2 e^{j(\omega t + \varphi_2)}, \quad (3)$$

где \dot{U}_1, \dot{U}_2 — комплексные сигналы, принятые первым и вторым рупорами соответственно.

Выразим разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ через отсчеты комплексных сигналов:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} &= \frac{U_1}{U_2} e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}; & U_1 &= \sqrt{\dot{U}_1 \dot{U}_1^*}; & U_2 &= \sqrt{\dot{U}_2 \dot{U}_2^*}; \\ \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \sqrt{\frac{\dot{U}_2 \dot{U}_2^*}{\dot{U}_1 \dot{U}_1^*}} &= e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}; & \frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2^*}{\sqrt{\dot{U}_1 \dot{U}_1^* \dot{U}_2 \dot{U}_2^*}} &= e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}; \\ \cos(\varphi_2 - \varphi_1) &= \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2^*}{\sqrt{\dot{U}_1 \dot{U}_1^* \dot{U}_2 \dot{U}_2^*}} \right); \\ \sin(\varphi_2 - \varphi_1) &= \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_1 \dot{U}_2^*}{\sqrt{\dot{U}_1 \dot{U}_1^* \dot{U}_2 \dot{U}_2^*}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Используя представление сигналов в виде квадратурных компонент U_s, U_c , получаем

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{U_{s1} U_{c2} - U_{c1} U_{s2}}{U_{c2} U_{c1} + U_{s2} U_{s1}} \right). \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) позволяют измерить фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ сигналов, принятых по верхнему и нижнему лучам, и далее по формуле (2) оценить угол места воздушного объекта в пределах интервала однозначного измерения фазы.

Возможность использования рассматриваемого метода измерения угла места в двухкоординатных РЛС экспериментально исследовалась на РЛС "Утес-А". Для контроля результатов измерения угла места использовались данные о высоте воздушного объекта, полученные вторичным локатором.

В данной РЛС при цифровой обработке принятого сигнала (оптимальной фильтрации, селекции движущихся целей, обнаружения сигнала) в интервале корреляции сжатого сигнала лежат два отсчета. При проведении экспериментов по измерению угла места фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ определялся по квадратурным (комплексным) компонентам отсчета, ближайшего к максимуму огибающей обнаруженного сигнала. Влияние фазовой характеристики согласованного фильтра не учитывалось.

На рис. 2 приведены примеры результатов экспериментальных исследований. Из рис. 2, а, б видна повторяемость результатов измерения

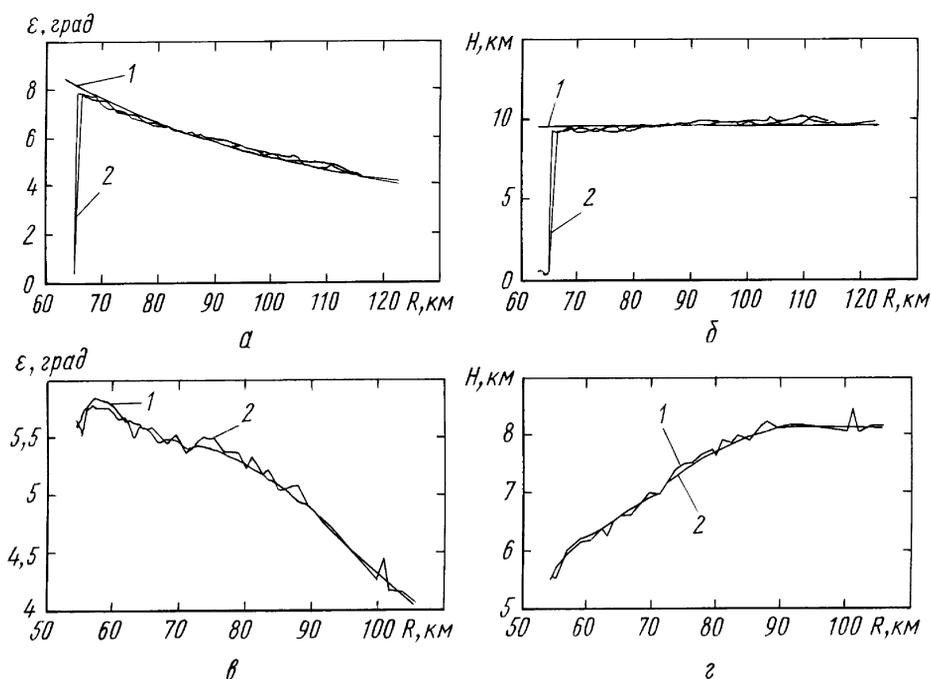


Рис. 2. Зависимости угла места (а, в) и высоты (б, г) воздушного объекта, летящего на постоянной высоте (а, б) и со снижением (в, г):

1 — по данным вторичного локатора; 2 — с использованием рассматриваемого метода

высоты и угла места, полученных для приближающегося и удаляющегося объекта. Среднеквадратическая погрешность измерения угла места составила приблизительно $8'$, высоты — около 100 м. Из рис. 2, а, б по резкому изменению угла места (на дальности приблизительно 65 км) можно определить диапазон однозначного измерения угла места. Для РЛС “Утес-А” этот диапазон составляет приблизительно $7,8^\circ$, что соответствует разносу h эффективных фазовых центров приблизительно на 1,7 м. Заметим, что доплеровский набег фазы отраженного сигнала практически не оказывает влияния на точность измерения угла места рассматриваемым методом.

Для устранения неоднозначности измерения фазы обычно используется метод “грубого” и “точного” замеров за счет использования “короткой” и “длинной” измерительных баз. Конструкция антенной системы рассматриваемых РЛС не позволяет реализовать дополнительную измерительную базу. В то же время, дополнительную информацию, позволяющую устранить неоднозначность, можно получить, используя замеры на другой несущей частоте.

Обозначим через λ_1 и λ_2 длины волн первого и второго частотных каналов РЛС, причем $\lambda_1 < \lambda_2$. Запишем аналогично формуле (1):

$$\frac{h \sin \varepsilon}{\lambda_1} = \frac{\Delta\varphi_1 + 2\pi k_1}{2\pi}; \quad (6)$$

$$\frac{h \sin \varepsilon}{\lambda_2} = \frac{\Delta\varphi_2 + 2\pi k_2}{2\pi}; \quad (7)$$

здесь k_1, k_2 — целые числа.

Из формул (6) и (7) получаем

$$\frac{\lambda_1 \Delta\varphi_1 - \lambda_2 \Delta\varphi_2}{2\pi} = k_2 \lambda_2 - k_1 \lambda_1. \quad (8)$$

Уравнение (8) содержит неизвестные параметры k_1 и k_2 . Введем дополнительное условие, что длины волн λ_1 и λ_2 различаются незначительно. Вследствие этого для измеряемых максимальных углов места ε_{\max} параметры k_1 и k_2 различаются не более чем на единицу. Тогда возможны следующие ситуации.

1. Номера интервалов неоднозначности k_1 и k_2 одинаковы, т.е. $k_1 = k_2 = k$. Такая ситуация возникает чаще всего при малых углах места. В этом случае решение уравнения (8) имеет вид

$$k = \left[\frac{\lambda_1 \Delta\varphi_1 - \lambda_2 \Delta\varphi_2}{2\pi (\lambda_2 - \lambda_1)} + 0,5 \right]; \quad (9)$$

здесь $[x]$ — целая часть от x .

2. Номера интервалов неоднозначности различаются на единицу, т.е. $k_1 = k$, $k_2 = (k \pm 1)$. В этом случае решение уравнения (8) имеет вид

$$k = \left[\frac{\lambda_1 \Delta\varphi_1 - \lambda_2 \Delta\varphi_2 \mp 2\pi\lambda_2}{2\pi(\lambda_2 - \lambda_1)} + 0,5 \right]. \quad (10)$$

Для нахождения k следует решать оба уравнения (9) и (10) и отбирать из найденных значений наименьшее значение k_{\min} .

Найденное значение k подставим в выражение (2) для расчета оценок угла места по данным обоих частотных каналов:

$$\varepsilon_1 = \arcsin\left(\frac{\lambda_1(\Delta\varphi_1 + 2\pi k)}{2\pi h}\right); \quad (11)$$

$$\varepsilon_2 = \arcsin\left(\frac{\lambda_2(\Delta\varphi_2 + 2\pi k)}{2\pi h}\right). \quad (12)$$

Учитывая статистическую независимость шумов в частотных каналах, оценки ε_1 и ε_2 можно усреднить:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}. \quad (11)$$

Произведем оценку необходимой величины разности несущих частот РЛС с учетом введенных ограничений для номеров интервалов неоднозначности.

Для края диапазона измерения при $\varepsilon = \varepsilon_{\max}$, когда $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = 0$ и $|k_1 - k_2| = 1$, из выражений (6) и (7) следует

$$\left(\frac{h}{\lambda_1} - \frac{h}{\lambda_2}\right) \sin \varepsilon_{\max} = 1,$$

т.е.

$$\sin \varepsilon_{\max} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{h(\lambda_2 - \lambda_1)} = \frac{c}{h(f_1 - f_2)}, \quad (12)$$

где $f_1 = c/\lambda_1$, $f_2 = c/\lambda_2$ — несущие частоты первого и второго каналов; c — скорость света.

Поскольку значение выражения (12) не должно превышать единицу, то необходимо наложить ограничение на максимальное значение разности $f_1 - f_2$, при котором обеспечивается однозначное двухчастотное измерение угла места в заданном диапазоне:

$$\max(f_1 - f_2) < \frac{c}{h \sin \varepsilon_{\max}}. \quad (13)$$

Учитывая, что $\varepsilon_{\max} \leq \pi/2$, получим

$$\max(f_1 - f_2) < \frac{c}{h}. \quad (14)$$

Например, для РЛС “Утес-А” при $h \approx 1,7$ м допустимая величина разности частот не должна превышать 150 МГц для однозначного измерения угла места в диапазоне $0 \dots 90^\circ$.

Рассмотренный двухчастотный амплитудно-фазовый метод измерения угла места был исследован с помощью математического моделирования. При моделировании рассматривалась система с двумя приемными лучами, работающая на двух частотах с разностью частот примерно 4 % от несущей частоты. Длина измерительной базы h задавалась равной 2 м. Исследования проводились для разных значений наклонной дальности и скорости объекта. При моделировании производился прямой расчет фаз входных сигналов с учетом геометрии системы, т.е. предположение о параллельности лучей не использовалось. Шумы в приемных каналах полагались некоррелированными нормально распределенными случайными процессами с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

В результате статистического эксперимента фиксировались следующие параметры: смещенность Δ оценки угла места ε , ее среднее квадратическое отклонение σ , суммарная ошибка $\delta = \sqrt{\Delta^2 + \sigma^2}$, а также вероятность P правильного определения номера k интервала однозначного измерения. Следует отметить, что ошибка в определении k приводит к аномальным ошибкам измерения угла места, кратным длине интервала однозначного измерения, который приблизительно равен $\arcsin(\lambda/h)$.

Из рис. 3, 4 видно, что оценки угла места оказываются практически несмещенными ($\Delta \approx 0$), а среднее квадратическое отклонение возрастает с увеличением модуля угла места. Последнее обусловлено чувствительностью преобразования (2) к погрешностям измерения аргумента при приближении значения аргумента к единице. Потенциальная точность измерения угла места в представляющем практический интерес диапазоне углов $-5 \dots 45^\circ$ высокая.

Как уже указывалось, при измерении угла места фазовым методом возможно возникновение аномальных оценок угла места, связанных с ошибочным определением номера k интервала неоднозначности. В ходе моделирования были получены гистограммы оценок угла места. Из рис. 5 видно, что оценки группируются около истинного значения и в соседних интервалах неоднозначности (аномальные оценки). Вероятность появления аномальных оценок довольно быстро падает с увеличением отношения сигнал/шум. Так, при $Q = 25$ дБ вероятность по-

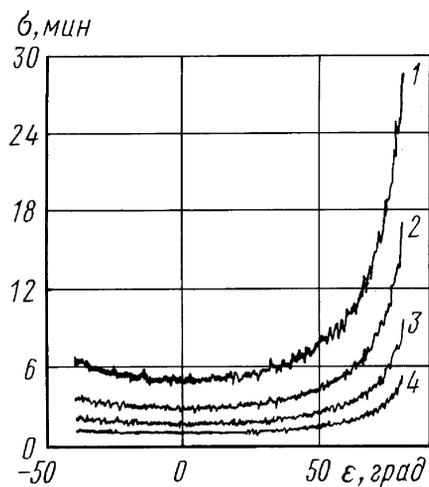


Рис. 3. Зависимости среднего квадратического отклонения оценок угла места при значениях отношения сигнал/шум $Q = 25$ (1), 30 (2), 35 (3), 40 (4) дБ

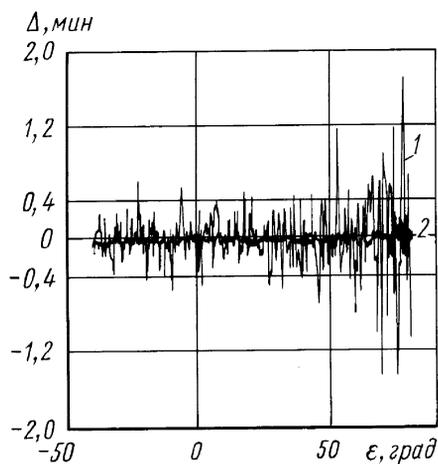


Рис. 4. Графики смещенности оценок угла места при значениях отношения сигнал/шум $Q = 25$ (1), 40 (2) дБ

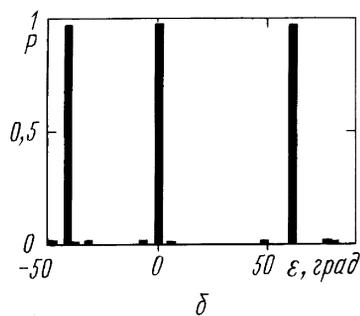
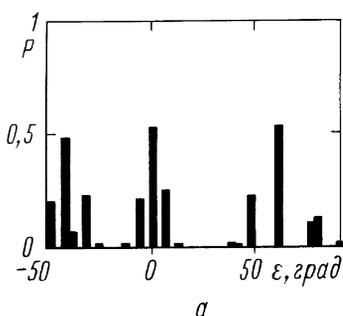


Рис. 5. Гистограммы для трех значений (-45° , 0° и 60°), полученные при значениях отношения сигнал/шум $Q = 25$ (а), 35 (б) дБ

явления аномальных оценок составляет 0,5, при $Q = 35$ дБ эта вероятность равна 0,03.

В ходе радиолокационного обзора от каждой цели в зоне ответственности получают пачку отраженных сигналов со смежных азимутальных направлений. В этом случае появляется возможность для каждой цели получить несколько независимых (частных) оценок угла места, статистическая обработка которых позволяет снизить вероятность появления аномальных оценок P_a , т.е. повысить вероятность правильного определения номера интервала неоднозначности.

Можно предложить следующий вариант обработки частных оценок угла места для снижения вероятности появления аномальных оценок. По выборке полученных частных оценок находится наиболее вероятная оценка $\tilde{\varepsilon}$ угла места. Окончательная оценка угла места $\hat{\varepsilon}$ рассчиты-

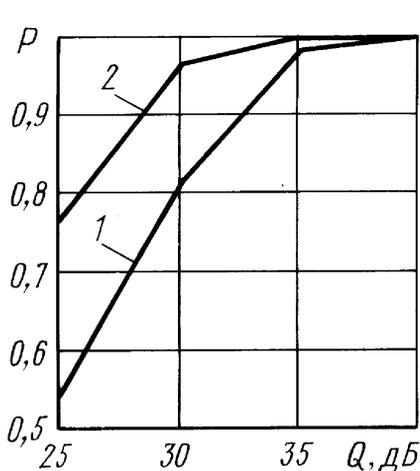


Рис. 6. Графики вероятности $P = 1 - P_a$ получения достоверной оценки угла места при использовании алгоритма с применением селекции оценок (2) и без него (1)

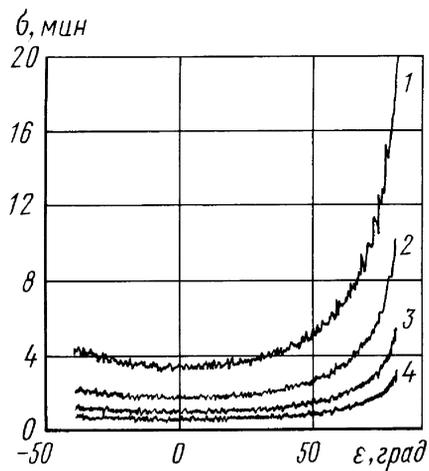


Рис. 7. Зависимости среднего квадратического отклонения оценок угла места при отношениях сигнал/шум $Q = 25$ (1), 30 (2), 35 (3), 40 (4) дБ

вается путем усреднения частных оценок, отклонение которых от оценки $\tilde{\epsilon}$ не превышает половины интервала однозначного измерения. Наиболее вероятную оценку $\tilde{\epsilon}$ можно найти путем ранжирования выборки частных оценок с последующим отбором медианного значения полученного ранжированного ряда.

Указанный алгоритм с применением селекции оценок проверялся с помощью статистического моделирования. При этом для получения оценок угла места использовались отсчеты, получаемые по двум частотным каналам с трех смежных азимутальных направлений при уменьшении амплитуд крайних отсчетов на 3 дБ. Из рис. 6 видно, что использование указанного алгоритма позволяет существенно повысить вероятность P получения достоверных оценок.

Следует также отметить, что поскольку в рассматриваемом алгоритме производится усреднение независимых частных оценок, среднее квадратическое отклонение оценок уменьшается пропорционально корню квадратному из числа усредняемых отсчетов (рис. 7 и см. рис. 3).

Таким образом, результаты исследования амплитудно-фазового метода измерения угла места дают основания рекомендовать данный метод для повышения информативности двухкоординатных РЛС системы управления воздушным движением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А м и а н т о в И. Н. Избранные вопросы статистической теории связи. – М.: Сов. радио, 1971. – 416 с.

Статья поступила в редакцию 25.06.2003

Галина Анатольевна Профатилова родилась в 1947 г., окончила в 1971 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области обработки радиолокационной информации.

G.A. Profatilova (b. 1947) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1971. Ph. D. (Eng.), senior researcher of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 60 publications in the field of radar data processing.



Григорий Николаевич Соловьев родился в 1946 г., окончил в 1970 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Радиоэлектронные системы и устройства” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 75 научных работ в области обработки радиолокационной информации.

G.N. Solov'iov (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Ph.D. (Eng.), ass. professor of “Radio Electronic Systems and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 75 publications in the field of radar data processing.

**В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла из печати книга**

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

Учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов и др.; под ред. В.Н. Рождествина. – 2002. – 528 с. (в пер.)

Книга состоит из двух частей – “Лазерные оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды” и “Пассивные оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды”. В части I изложены физические основы лазерного зондирования, принципы построения лидарных систем экологического мониторинга и приведены примеры лидарных систем экологического мониторинга. Часть II посвящена физическим основам пассивного оптического контроля, принципам организации систем спутникового экологического мониторинга и построению пассивных оптико-электронных приборов дистанционного контроля окружающей среды. Приведены примеры спутниковой оптико-электронной аппаратуры для экологического мониторинга природной среды. Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который читают авторы в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов, обучающихся по направлению “Оптехника”, а также для научных и инженерно-технических работников приборостроительного профиля.